

PROCESSING COPY

OCT

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY

This material contains information affecting the National Defense of the United States within the meaning of the Espionage Laws, Title 18, U.S.C. Secs. 793 and 794, the transmission or revelation of which in any manner to an unauthorized person is prohibited by law.

C-O-N-F-I-D-E-N-T-I-A-L

COUNTRY	Rumania	REPORT	
SUBJECT	Petroleum Engineering Manual	DATE DISTR.	7 June 1957 25X1
		NO. PAGES	1
		REQUIREMENT NO.	RD
DATE OF INFO.		REFERENCES ATTACHMENT(S)	NOT 25X1
PLACE & DATE ACQ.		MICROFILMED	

SOURCE EVALUATIONS ARE DEFINITIVE APPRAISAL OF CONTENT IS TENTATIVE

1. Available in CIA Library is a copy of Manualul Inginerului Petrolist (Petroleum Engineering Manual), published in Bucharest in 1955. 25X1
2. When detached from the cover page the publication is unclassified.

25X1

W
B

C-O-N-F-I-D-E-N-T-I-A-L

STATE	<input checked="" type="checkbox"/> ARMY	<input checked="" type="checkbox"/> NAVY	<input checked="" type="checkbox"/> AIR	<input checked="" type="checkbox"/> FBI	AEC					
-------	--	--	---	---	-----	--	--	--	--	--

(Note: Washington distribution indicated by "X"; Field distribution by "#".)

INFORMATION REPORT INFORMATION REPORT

MANUALUL
INGINERULUI
PETROLIST

44

EDITURA TEHNICĂ

STAT

Page Denied

MANUALUL INGINERULUI PETROLIST

MANUALUL INGINERULUI PETROLIST

44

**EXPLOATAREA ZĂCĂMINTELOR
DE ȚITEI ȘI GAZE**

PARTEA I-a

BAZELE ȘTIINȚIFICE



EDITURA TEHNICĂ
BUCUREȘTI 1955

COLECTIVUL DE ELABORARE

- CAPITOLUL I HIDRAULICA GENERALĂ
Ing. TH. GOLDFRACHT
- CAPITOLUL II HIDRAULICA SUBTERANĂ
Ing. TH. GOLDFRACHT
- CAPITOLUL III FIZICA ZĂCĂMINTELOR DE ȚIȚEI ȘI GAZE
Proprietățile rocilor colectoare și ale rocilor învecinate
Ing. G. MANOLESCU
- CAPITOLUL IV FIZICA ZĂCĂMINTELOR DE ȚIȚEI ȘI GAZE
Proprietățile fluidelor de zăcămint
Ing. G. MANOLESCU
- CAPITOLUL V FIZICA ZĂCĂMINTELOR DE ȚIȚEI ȘI GAZE
Fenomene de golire a zăcămintelor sub acțiunea factorilor naturali
Ing. G. MANOLESCU
- CAPITOLUL VI FIZICA ZĂCĂMINTELOR DE ȚIȚEI ȘI GAZE
Fenomene de golire a zăcămintelor sub acțiunea factorilor artificiali
Ing. G. MANOLESCU
- CAPITOLUL VII PROIECTAREA EXPLOATĂRII ZĂCĂMINTELOR DE ȚIȚEI ȘI GAZE
Ing. M. METSCH



COORDONATOR
Ing. G. MANOLESCU

TABLA DE MATERII

Capitolul I

Hidraulica generală

	<u>pag.</u>	<u>pag.</u>
A. Generalități asupra fluidelor.....	1	(14); 2. Orificiu mare cu muchii ascuțite (15); 3. Ori-
a. Noțiuni generale	1	ficiu circular (15); 4. Orificiu cu muchie ascuțită,
b. Capilaritatea și tensiunea superficială	2	înecat din aval (15); 5. Orificiu cu ajutoare (16); 6.
c. Elasticitatea și compresibilitatea	2	Golirea rezervoarelor prin orificii (16);
d. Absorbția gazelor	3	c. Fenomenul de cavitație.....
B. Hidrostatica	4	f. Întâlnirea unui obstacol de către un fluid
a. Echilibrul static al lichidelor și al gazelor ținând	4	1. Confuența a doi curenți (17); 2. Complement
seama de greutate	4	asupra suprafeței de discontinuitate (18); 3. Măsu-
b. Principiul lui Pascal	5	rarea presiunii fluidelor în mișcare (18).
c. Ecuațiile lui Euler	5	g. Circulația
1. Lichid în cimpul gravitațional static (5); 2. Lichid	5	h. Valabilitatea ecuației lui Bernoulli, perpendicular
în cimpul gravitațional radial (5); 3. Lichid în rotație	5	pe direcția de curgere.....
uniformă în jurul unui ax (5).	5	Curgerea circulatorie
d. Suprapresiune și linie piezometrică	6	i. Rotația
e. Măsurarea presiunilor	6	j. Teorema circulației constante.....
1. Manometru cu un braț cu apă (6); 2. Manometru	6	k. Curgerea potențială
cu mercur cu două brațe (6); 3. Manometru cu arc	6	1. Potențialul de viteză Φ satisface ecuația lui Laplace
(7); 4. Manometru diferențial (7).	6	(21) 2. Curgerea potențială plană (21);
f. Forța de presiune exercitată de un lichid pe pereți	7	1. Rețelele elementare de curgere potențială plană..
1. Pereți plani-inclinați (7); 2. Forța de presiune pe	7	1. Rețeaua curgerii plan-paralele (22); 2. Rețeaua
fundul vaselor (8); 3. Presiunea lichidului pe supra-	7	unei surse (izvor) (22); 3. Dubletul sau dipolul(23);
fața în spațiu (8);	7	m. Combinarea de rețele potențiale
g. Forțele de presiune exercitate asupra corpurilor	8	1. Combinarea unei surse cu o curgere paralelă (24);
cufundate în lichid	8	2. Două surse de același sens și de intensitate egală
h. Plutirea corpurilor	8	(24) 3. Combinarea unei surse pozitive cu o sursă
1. Stabilitatea transversală a corpurilor plutitoare (8);	8	negativă de intensitate egală (24); 4. Suprapunerea
2. Stabilitatea longitudinală a corpurilor plutitoare (8);	8	unui dipol cu o curgere paralelă (25); 5. Suprapunerea
C. Cinematica fluidelor	9	unui dipol, a unui curent paralel și a unei curgeri
a. Descrierea cinematică a fenomenului de curgere	9	circulatorii (25); 6. Aplicații practice ale unei curgeri
1. Metoda lui Lagrange (9); 2. Metoda lui Euler (10);	9	de tipul celei de la 5. (26).
b. Noțiuni de curgere	10	n. Reprezentări conforme
c. Legea conservării materiei în mecanica fluidelor	10	Exemple: (26)
(legea continuității)	11	o. Teorema impulsului
Ecuația generală a continuității.....	11	E. Dinamica fluidelor reale incompresibile
D. Dinamica fluidelor incompresibile fără frecare inte-	12	a. Caracteristicile curgerii fluidelor reale.....
rioară (ideale)	12	b. Teoria generală a frecării interioare
a. Legea lui Bernoulli.....	12	Ecuațiile diferențiale ale lui Navier-Stokes.....
b. Ecuațiile hidrodinamice generale ale lui Euler	13	c. Similitudinea în hidrodinamică
pentru curgerea fluidelor ideale	13	d. Deplasarea unui corp solid într-un fluid viscos..
c. Oscilațiile în conducte, sub influența greutatei....	13	e. Curgerea laminară și turbulentă
d. Curgerea prin orificii.....	13	1. Curgerea laminară și turbulentă (34); 2. Zona de
Orificiu cu muchie ascuțită și cu secțiune mică	13	trecere de la curgerea laminară la cea turbulentă (35);
		3. Turbulența (35)

VIII

TABLA DE MATERII

	<u>pag.</u>		<u>pag.</u>
f. Formarea vîrtejurilor și măsuri contra dezlipirii stratului-limită	36	j. Curgerea prin conducte cu variație de direcție ..	42
Curenți secundari	37	1. Curgerea prin conducte curbe (42); 2. Curgerea prin coturi frînte (43); 3. Curgere prin conducte în T (43);	
g. Curgerea în conducte circulare	37	k. Calculul conductelor	43
1. Curgerea laminară a lichidelor (37); 2. Trecerea de la curgerea laminară la cea turbulentă (38); 3. Curgerea turbulentă (38).		l. Măsurări de debite	45
h. Curgerea în conducte cu alte secțiuni (necirculare)	39	1. Curgerea peste un deversor (45); 2. Măsurarea debitelor de gaze (46).	
1. Curgerile în albiu cu rugozitate (39); 2. Riuri și canale (4).		m. Rezistența opusă corpurilor în mișcare de masă fluidă	47
i. Curgerea prin conducte drepte și cu secțiune variabilă	40	Constatări experimentale asupra rezistenței ce o opun fluidele la înaintarea corpurilor solide	47
1. La o micșorare de secțiune (40); 2. Mărirea bruscă de secțiune (41); 3. Curgerea prin conducte drepte cu secțiune variabilă continuă (41).		n. Elemente de mașini hidraulice	49

Capitolul II

Hidraulica subterană

A. Generalități și principii de bază ale hidraulicii subterane	51	1. Curgerea unidimensională printr-un mediu poros a unui fluid omogen și incompresibil (69); 2. Curgerea radial-plană a fluidelor omogene și incompresibile (69);	
a. Generalități	51	c. Curgerea unui fluid omogen și incompresibil într-un mediu poros în ipoteza că există simultan două regimuri de filtrare	70
b. Considerarea zăcămintului de petrol și de gaze ca un tot întreg	51	d. Curgerea radial-plană asimetrică a fluidelor omogene și incompresibile	71
1. Raza de drenaj (51); 2. Energiile de zăcămint (51);		1. Curgerea spre o sondă în cazul cînd presiunea este neuniform distribuită pe conturul de alimentare (71); 2. Curgerea spre o sondă situată excentric față de conturul circular de alimentare (72); 3. Curgerea spre o sondă în cazul unui contur liniar de alimentare de mărime infinită (72); 4. Curgerea spre o sondă în cazul unui contur liniar de alimentare de mărime finită (73); c. Curgerea fluidelor omogene și incompresibile prin strate de permeabilitate neuniformă	75
c. Unități de măsură și analogii	52	1. Curgerea fluidelor omogene și incompresibile prin medii poroase de permeabilitate neuniformă după legea liniară de filtrare (75); 2. Curgerea fluidelor omogene prin medii poroase de permeabilitate neuniformă, după legea neliniară de filtrare al lui Grasnopolski	81
d. Sistemele de coordonate	53	f. Imperfecția sondelor	81
1. Coordonate cilindrice (53); 2. Coordonate sferice (53); 3. Coordonate curbilini (53).		1. Imperfecțiunea sondelor din punctul de vedere al gradului de deschidere (82); 2. Imperfecțiunea sondelor din punctul de vedere al modului de deschidere (86).	
e. Presiuni hidraulice și mecanice reduse	54	E. Analiza curgerii fluidelor omogene și compresibile	88
B. Curgerea fluidelor omogene printr-un mediu poros	54	a. Curgerea lichidelor compresibile prin mediu poros	88
a. Elemente și noțiuni de bază	54	1. Noțiuni de bază (88); 2. Ecuațiile curgerii lichidelor compresibile prin medii poroase (89);	
1. Mediul poros (55); 2. Viteza de filtrare fictivă și viteza reală (55).		3. Curgerea staționară a unui lichid compresibil (90);	
b. Legea filtrării	55	4. Curgerea radială nestaționară a unui lichid compresibil (91); 5. Efectul închiderii sondei asupra nivelului dinamic al sondei (98).	
1. Legile filtrării prin medii poroase fictive (55); 2. Legea liniară de filtrare sau legea lui Darcy (56); 3. Ecuațiile hidrodinamice generale folosite la curgerea omogenă a fluidelor prin medii poroase (59); 4. Condiții inițiale și condiții la limită (61).		b. Curgerea gazelor în mediul poros	98
C. Curgerea fluidelor eterogene prin medii poroase	62	1. Curgerea staționară a gazelor printr-un mediu poros (99); 2. Curgerea nestaționară a gazelor printr-un mediu poros (102);	
a. Noțiuni generale	62		
b. Experiențe și concluzii	63		
Concluzii experimentale	63		
c. Ecuațiile hidrodinamice ale curgerii fluidelor eterogene	63		
1. Generalizarea ecuației lui Darcy (63); 2. Ecuațiile generale ale mișcării (63).			
D. Analiza curgerii fluidelor omogene și incompresibile	64		
a. Curgerea fluidelor omogene și incompresibile care respectă legea liniară a filtrației (legea lui Darcy)	64		
1. Curgerea unidimensională într-un mediu poros a unui lichid omogen și incompresibil (64); 2. Curgerea plană a fluidelor omogene și incompresibile (65);			
3. Curgerea tridimensională a unui fluid omogen și incompresibil printr-un mediu poros (67).			
b. Curgerea fluidelor omogene și incompresibile care nu respectă legea liniară de filtrare (legea lui Darcy)	68		

TABLA DE MATERII

IX

	pag.		pag.
F. Curgerea gravitațională	102	H. Teoria hidrodinamică a unor probleme de exploatare	108
a. Generalități	102	a. Teoria hidrodinamică a exploatării piteiului prin împingerea de apă	108
b. Curgerea unidimensională sub acțiunea gravitației	102	1. Noțiuni generale (108); 2. Avansarea contactului apă-pitei (108).	
1. Cazul valabilității legii liniare de filtrare (102);		b. Teoria hidrodinamică a formării conurilor de apă.	111
2. Cazul valabilității legii neliniare de filtrare (103);		1. Generalități (111); 2. Calculul analitic (111).	
c. Curgerea radial-plană	103	c. Teoria hidrodinamică a proceselor de spălare cu apă sau gaze	112
1. Cazul valabilității legii liniare de filtrare (103);		1. Generalități (112); 2. Spălarea cu apă (114); 3. Spălarea cu gaze (123).	
2. Cazul valabilității legii neliniare de filtrare (103).		I. Interferența sondelor (interacțiunea sondelor)	125
G. Curgerea eterogenă	103	a. Generalități	125
a. Generalități	103	b. Teoria generală a interferenței (interacțiunii)	125
b. Curgerea eterogenă staționară unidimensională ..	104	1. Interacțiunea unui grup de sonde (125); 2. Interacțiunea sondelor dintr-un șir infinit de sonde (128).	
1. Distribuția presiunii (104); 2. Ecuația debitului (104); 3. Observații (104); 4. Modul de lucru (105).			
c. Curgerea eterogenă staționară radial-plană	105		
1. Curgerea bifazică (105); 2. Curgerea trifazică (107);			

Capitolul III

Fizica zăcămintelor de pitei și gaze

A. Proprietățile rocilor colectoare și ale rocilor învecinate	133	nări directe cantitative ale saturației în apă, în pitei și gaze prin metode de laborator (149); 5. Permeabilitatea rocilor colectoare și învecinate (154); a) Generalități. Definiții (154); b) Determinarea experimentală (159); c) Etalonarea reometrelor (166); d) Pregătirea epruvetei pentru determinarea permeabilității (167);
Definiția și elementele zăcămintului	133	6. Determinarea conținutului de cloruri din probe (168); 7. Determinarea conținutului în carbonați ai probelor (169); a) Metoda indirectă (169); b) Metode directe (169); 8. Compresibilitatea rocilor colectoare (171); 9. Proprietățile electrice și magnetice ale rocilor colectoare și ale rocilor de etanșare învecinate (173);
B. Caracteristicile rocilor magazin și ale rocilor învecinate	133	a) Rezistivitatea electrică (173); 1) Influența porozității asupra rezistivității (175); 2) Influența saturației asupra rezistivității (176); 3) Influența temperaturii asupra rezistivității rocilor (176); 4) Influența texturii rocilor asupra rezistivității lor electrice (176); 5) Influența structurii rocilor asupra rezistivității lor electrice (178); b) Permeabilitatea dielectrică a rocilor colectoare și a rocilor învecinate (178); c) Activitatea electrochimică a rocilor colectoare și a rocilor învecinate (179); 1) Activitatea de difuzie-adsorbție (179); 2) Activitatea de oxidare-reducere (180); 3) Activitatea electrocinetică (179); d) Proprietățile magnetice ale rocilor colectoare (181); e) Alte proprietăți fizice și fizico-chimice ale rocilor colectoare (181).
a. Definiții	133	
1. Rocile-magazin (133); 2. Rocile de etanșare (133).		C. Influența reciprocă a diferiților parametri ai rocii colectoare
b. Proprietățile fizico-mecanice ale rocilor-magazin și ale rocilor de etanșare (învecinate)	134	181
1. Densitatea (134); 2. Compoziția granulometrică (134); a) Metode de analiză (134); b) Interpretarea rezultatelor (137); 1) Diametrul mediu (137); 2) Coeficientul de neuniformitate granulometrică (138); 3) Coeficientul de disimetrie (138); 4) Coeficientul de concentrație (138); 3. Porozitatea (definiții) (138); a) Porozitatea rocilor reale (139); b) Determinarea porozității (140); c) Metode de determinare a volumului brut al probei V_b (140);		1. Influența porozității asupra densității și a densității asupra porozității (181); 2) Influența compoziției granulometrice asupra porozității (182); 3. Influența porozității asupra permeabilității (182); 4. Influența compoziției granulometrice asupra permeabilității absolute (183); 5. Influența saturației asupra permeabilității (188)
1) Metode bazate pe cufundarea probei în mercur (140); 2) Metode bazate pe determinări asupra unor probe saturate cu lichid cu viscozitate mică (141); 3) Metode bazate pe cântărirea probei în aer și pe cufundarea ei într-un lichid împiedicat de a intra în probă prin acoperirea acesteia (141); 4) Metode bazate pe procedee geometrice sau mecanice (142); 5) Alte metode (142); d) Metode de determinare a volumului net al probei sau a volumului elementelor minerale V_m (142);		
1) Metoda aproximativă (142); 2) Metoda exactă (142). e) Metode de determinare a volumului porilor probei V_g (142);		D. Recoltarea, transportul și conservarea probelor de rocă și organizarea acestor operații
1) Metoda prin saturație indirectă la (2α) (142); 2) Metoda evacuării totale de gaze a porilor probei (142); 3) Metoda evacuării parțiale de gaze (143).		188
4. Saturația rocilor-magazin (144); a) Determinări calitative ale saturației în pitei (147); 1) Proba colorimetrică (147); 2) Proba de fluorescență (147); 3) Determinarea indirectă a saturației în apă sărată cu ajutorul datelor de carotaj electric (148); b) Determi-		a. Locul și frecvența extragerii probelor
		188

X

TABLA DE MATERII

	pag.		pag.
b. Recoltarea	188	c. Operații preliminare	189
1. Prin procesul normal de săpare (188); 2. Prin procesul de carotaj rotativ (189); 3. Prin procesul de carotaj percutant (189).		1. Elementele de identitate (190); 2. Elementele tehnice de recoltare (190); 3. Elemente de examinare (190).	
		d. Operații de cercetare practicate asupra probei	190

Capitolul IV

Fizica zăcămintelor de petrol și gaze.

Proprietățile fizice și chimice ale fluidelor care saturează în mod normal sau artificial rocile colectoare și rocile învecinate

A. Complemente de fizico-chimie în legătură cu condițiile de prezentare și de comportare a sistemelor fluide din zăcămintele de hidrocarburi	193	de hidrogen, pH (250); 1) Determinări colorimetrice (251); 2) Determinări electrometrice (253).	
a. Stări de agregare și schimbarea lor	193	b. Apa mineralizată	252
1. Sistemele simple (193); a) Trecerea dintr-o stare de agregare în alta (195) b) Legea de stare. Volume specifice. (197); 2. Sistemele multicomponente (200)		1. Greutatea specifică (252); 2. Viscositatea apei mineralizate (253); 3. Compresibilitatea elastică a apei sărate (253); 4. Coeficientul de dilatare termică (255); 5. Capacitatea de a dizolva solidele (253); 6. Conductibilitatea electrică (255);	
b. Legea fazelor	200	c. Mineralizația apelor	256
1. Aplicarea la un sistem unicomponent (200); 2. Aplicarea la un sistem bicomponent (201);		1. Compoziția mineralizației (256); 2. Clasificarea apelor după mineralizație (257); 3. Ciclul de mineralizare-demineralizare al apei în lito-hidro-atmosferă (259); 4. Reprezentarea simbolică sau sinoptică a mineralizației (260); a) Metoda salinității-alcalinității (260); b) Metoda Tackell (261); c) Metoda Tolstihin (261); d) Metoda diagramei genetice a lui Sulin (261)	
c. Comportare de fază, echilibru și transformări în echilibru	202	e) Metoda Ing. Iordăchescu (262); 5. Componentii principali ai mineralizației apelor naturale (262); a) Calciu (262); b) Magneziul (262); c) Fierul (263); d) Sodiul și potasiul (263); e) Acidul carbonic liber, anionii carbonat și hidro (bi)-carbonat (264); f) Alcalinitatea (267); g) Clorul (267); h) Sulfatii (268); i) Dureitatea apei (269); j) Oxidabilitatea (269); 6. Caracteristicile generale ale apelor naturale (269); a) Apele marine (269); b) Apele « dulci » de uscat (270); c) Apele de zăcămint (270); d) Microcomponentii (270); e) Radioactivitatea (271); f) Microcomponentii « negativi » (271);	
1. Transformări ce interesează exploatarea petrolului (202); 2. Transformarea gaz-lichid și lichid-gaz (203); 3. Sisteme binare cu compoziție globală fixă. (205); 4. Sisteme ternare (208);		d. Hidrocarburile	271
d. Comportare de volum. Volume specifice. Greutăți specifice.	211	1. Proprietăți individuale ale hidrocarburilor (271); a) Alcani inferiori (271); 1) Metanul CH ₄ (271); 2) Etanul (282); 3) Propanul (292); 4) Butanul (294); b) Alcanii superiori (314); c) Hidrocarburi din alteserii (319); d) Anhidrida carbonică (320); e) Hidrogenul sulfurat (320); 2. Proprietățile sistemelor multicomponente de hidrocarburi (320); a) Sisteme constituite exclusiv din hidrocarburi (320); b) Sisteme cu hidrocarburi și cu apă (346); c) Studiul experimental al proprietăților fizice ale sistemelor de hidrocarburi (350); 1) Recoltarea probelor (353); 2) Aparatură pentru cercetarea probelor și metodica cercetării (357);	
e. Comportare de compoziție	213		
1. Analiza comportării, bazată pe proporționalitatea solubilității cu presiunea (217); 2. Analiza comportării de fază, bazată pe coeficienții de fugacitate (218); 3. Analiza comportării de fază, bazată pe coeficienții de repartitie (echilibru) experimentali (219);			
B. Proprietățile fizice ale componentelor sistemelor fluide din zăcămintele de petrol și gaze	228		
a. Apa dulce	228		
1. Proprietățile de stare de agregare (228); 2. Proprietățile elastice (235); a) Variația volumului (235); b) Viteza de propagare a oscilațiilor elastice (238); 3. Proprietățile termice. Căldura specifică (241); 4. Proprietățile termodinamice (241); 5. Conductibilitatea termică a apei (242); 6. Proprietățile moleculare (244); a) Viscositatea (244); b) Tensiunea superficială a apei (245); 7. Proprietățile optice (246); a) Indicele de refracție (246); b) Culoarea (247); c) Opacitatea (248); 8. Proprietățile electrice și proprietățile magnetice (249); a) Permitivitatea (249); b) Susceptibilitatea (κ) și permeabilitatea (μ) (249); c) Conductibilitatea (c) (249); d) Concentrația în ioni			

Capitolul V

Fizica zăcămintelor de petrol și gaze

Fenomene de golire a zăcămintelor sub acțiunea factorilor naturali

A. Presiunea din zăcămintele de petrol și gaze	381	c. Presiunea de zăcămint	382
a. Originea presiunii	381	d. Măsurarea directă a presiunilor	833
b. Distribuția presiunii într-un zăcămint	382	e. Restabilirea presiunii într-o sondă oprită din exploatare	386

TABLA DE MATERII

XI

	pag.		pag.
f. Măsurarea presiunii de zăcămint cu ajutorul son- delor piezometrice	388	g. Permeabilitatea efectivă a rocilor față de siste- mele cu trei componenți imiscibili	407
B. Temperatura în zăcămintele de petrol și gaze....	389	1. Permeabilitatea față de apă (408); 2. Permeabili- tatea față de țiței (408); 3. Permeabilitatea față de gaz (408).	
a. Distribuția temperaturii într-un zăcămint	389	h. Concluzii asupra permeabilităților relative	409
b. Variația (scăderea) temperaturii în zăcămint în cursul exploatării	391	i. Interpretarea fizică a curbilor de permeabilitate relativă, în funcție de saturație	410
c. Măsurarea temperaturii de zăcămint	391	j. Presiune capilară, unghi de contact	410
1. Măsura valorii absolute a temperaturii (391); 2. Termocarotajul diferențial (393).		k. Presiunea capilară în rocile colectoare	413
C. Cîmpul de radiații gamma în rocile de zăcămint	393	l. Utilizarea curbilor de saturație-presiune capilară m. Metodele experimentale și aparatura folosită pentru ridicarea curbilor de desaturare	415 416
D. Saturația inițială a zăcămintelor	394	1. Metodele statice cuprind două variante (416); 2. Metode dinamice (418).	
a. Distribuția saturațiilor diferitelor fluide	394	n. Concluzii asupra modificării legii de curgere prin medii poroase, datorită prezenței altor faze..	418
b. Efectul umidității selective	396		
c. Zone de apă, de țiței și de gaze libere	396	G. Mecanismul procesului de golire a zăcămintului de țiței în condiții care favorizează stabilirea dife- ritelor regimuri energetice de golire	420
d. Problema determinării zonelor de tranziție	397	a. Regimul cu împingere de apă	421
e. Neuniformitatea compoziției în cadrul fiecărei faze	398	b. Regimul cu împingere de gaze libere	421
E. Fenomene de saturare și de desaturare	399	c. Regimul cu gaze din soluție	422
a. Fenomenele de saturare și de desaturare și forțele care le provoacă	399	d. Regimul gravitațional	422
b. Clasificarea regimurilor energetice de golire a zăcămintelor	399	H. Analiza cu ecuațiile de bilanș material a proce- sului de golire a zăcămintului	422
1. Clasificarea după mecanismul compensării căderii de presiune (399); 2. Clasificarea generală după Krilov, Glogovski și Nikolaevski (400)		I. Modul de acțiune al factorilor naturali de golire a zăcămintului	426
F. Condițiile curgerii eterogene	402	a. Regimul cu dezlocuire internă — cu gaze eliberate din soluție	426
a. Permeabilități efective	402	b. Regimul cu expansiune a zonei de gaze libere	432
b. Permeabilitatea efectivă a rocilor față de siste- mele apă-țiței	403	c. Efectul neuniformității presiunii și a saturației în zăcămint	434
c. Influența gradientilor de presiune	405	d. Regimul de drenaj pur gravitațional	434
d. Efectul variației tensiunii interfaciale	405	e. Regimul gravitațional mixt, cu suprapunerea efec- tului gazelor eliberate din soluție	437
e. Concluzii asupra permeabilității efective față de sistemele țiței-apă	406		
f. Permeabilitatea efectivă a rocilor față de siste- mele gaze-lichid	406		

Capitolul VI

Fizica zăcămintelor de țiței și gaze

Dinamica zăcămintelor. Fenomene ce au loc în cursul golirii zăcămintelor sub
acțiunea factorilor artificiali și a celor naturali

A. Condițiile intervenției prin factori artificiali	439	B. Analiza procesului de golire a zăcămintului în regimurile modificate prin intervenția factorilor artificiali, cu ecuațiile de bilanș material	453
a. Clasificarea procedurilor	439	a. Regimul cu împingere de apă	453
b. Condițiile fizice noi create în strat prin interven- ția factorilor artificiali. Modificările proprietăților rocilor	439	b. Regimul cu împingere (externă sau internă) de gaze	457
1. Alterarea permeabilității absolute (439); 2. Alte- rarea permeabilității prin modificarea parțială a saturației (442); 3. Modificarea permeabilităților efec- tive și a condițiilor de retenție capilară (442);		c) Regimul cu împingere simultană de gaze și de apă	457
c. Dezlocuirea țițeiului din roca colectoare de către apă și gaze prin procese de tip «static»	442	d. Condițiile și particularitățile folosirii ecuațiilor de bilanș material	458
1. Dezlocuirea țițeiului prin apă (443); 2. Dezlo- cuirea țițeiului prin gaze (444); d. Dezlocuirea și antrenarea țițeiului de către apă și de către gaze prin procese de tip «dinamic»	445	C. Natura, caracteristicile, domeniile și condițiile de aplicabilitate ale diferitelor metode de activarea golirii prin intervenția factorilor artificiali	461
1. Dezlocuirea și antrenarea cu apă (445); 2. Dez- locuirea și antrenarea cu gaze (447)		a. Metode care folosesc completarea energiei me- canice de drenaj	461

XII

TABLA DE MATERII

	pag.		pag.
1. Metode de menținere a presiunii (461); a) Menținerea presiunii prin injectare de apă (463); b) Menținerea presiunii prin injectare de gaze (463); c) Menținerea presiunii prin injectare simultană de apă și de gaze (464); 2. Refacerea presiunii prin injectare de apă sau de gaze (465); 3. Metode prin spălare și prin antrenare (467); a) Spălarea cu apă (467); b) Spălarea cu gaze (468); c) Domenii de apli- cabilitate ale spălării cu apă sau cu gaze (468); b. Metode care folosesc aplicarea unei depresiuni suplimentare la fundul sondelor de extracție....	469	c. Metode de exploatare care folosesc reducerea lucrului mecanic specific de drenaj	470
1. Metoda extracției forțate (469); 2. Metoda prin vacuum (470).		d. Metode de exploatare mixte, care folosesc atât reducerea lucrului mecanic de drenaj cât și comple- tarea energiei de zăcămint.	470
		1. Metode termice (470); a) Metoda cu abur supraîn- călzit (470); b) Metoda cu apă caldă, recentă; (471); c) Metoda injectării de gaze cu temperatură ridicată (471); d) Metoda gazeificării țițeiului prin combustie în strat (471); e) Concluzii asupra metodelor termice (471); 2. Metoda spălării cu gaze la presiune foarte redusă (471); 3. Metodele care folosesc acțiunea agenților biologici. (472).	
Capitolul VII			
Proiectarea exploatării zăcămintelor de țiței și gaze			
A. Principiile generale ale exploatării raționale a zăcămintelor de țiței și gaze	473	a galeriilor în zăcămintele liniare în regim cu împin- gere de apă și de expansiune a zonei de gaze libere (494); d) Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele liniare cu regim gravitațional (495); 5. Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele circulare (495); a) Zăcămintele circulare în regim cu împingere de apă (495); b) Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele circulare cu regim de ex- pansiune a zonei de gaze libere (496); c) Ampla- sarea rațională a galeriilor în zăcămintele circulare în regim cu împingere de apă și de expansiune a zonei de gaze libere (497); d) Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele circulare cu regim gravi- tațional (497); 6. Principiile de stabilire a debitului și duratei de exploatare a zăcămintelor de țiței (497); a) Factorii care determină ritmul de exploatare a zăcămintelor (497); b) Metoda de calcul a debitului și duratei de exploatare (497); 7. Determinarea conturului redus de alimentare la zăcămintele liniare (499); a) Zăcămintele liniare în regim cu împingere de apă (499); b) Zăcămintele liniare cu regim de expan- siune a zonei de gaze libere (500); 1) Presiunea în zona de gaze este constantă (500); 2) Presiunea în zona de gaze libere este variabilă (500); 8. Determi- narea conturului redus de alimentare, la zăcămintele circulare (500); a) Zăcămintele circulare în regim cu împingere de apă (500); b) Zăcămintele circulare cu regim de expansiune a zonei de gaze libere (501); 9. Determinarea debitului zăcămintelor exploatare la presiunea-limită de fund. (501); a) Zăcămintele lini- are (501); 1) Zăcămintele liniare în regim cu împingere de apă sau de expansiune a zonei de gaze libere sub presiune constantă (501); 2) Zăcămintele liniare în regim cu împingere de apă și expansiune a zonei de gaze libere sub presiune constantă (503); b) Determi- narea debitului zăcămintelor circulare, exploatare la presiunea-limită de fund (504); 1) Zăcămintele circulare în regim de împingere de apă (504); 2) Zăcămintele circulare cu regim de expansiune a zonei de gaze libere (504); c) Determinarea debitului zăcă- mintelor ovale, exploatare la presiunea-limită de fund (506); 1) Zăcămintele ovale în regim cu împingere de apă (506); 2) Zăcămintele ovale cu regim de ex- pansiune a zonei de gaze libere (507); 10. Determi- narea debitului zăcămintelor cu debite limită (507);	
a. Scopul exploatării raționale a zăcămintelor de țiței și gaze.	473		
b. Factorul hidrodinamic la exploatarea zăcămin- telor	473		
c. Factorul economic la exploatarea zăcămintelor	474		
d. Proiectarea exploatării raționale a zăcămintelor ..	476		
B. Exploatarea rațională a zăcămintelor de țiței....	477		
a. Stabilirea rezervelor de țiței și gaze	477		
1. Metoda volumetrică (477); a) Ecuațiile rezervelor (477); b) Parametrii din ecuațiile rezervelor (478); 2. Metoda declinului de producție (479); 3. Metoda bilanțului material (481); b. Regimul zăcămintului de țiței.	484		
1. Rolul regimului de zăcămint (484) 2. Regimul cu împingere de apă (484); 3. Regimul de expansiune a gazelor (485); a) Regimul de expansiune a zonei de gaze libere (485); b) Regimul de gaze din soluție (486); 4. Regimul elastic (486); 5. Regimul gravitațional (486)			
c. Recuperarea secundară	487		
d. Studiul caracterului zăcămintelor de țiței	487		
1. Obiectul studiului (487); 2. Studiul caracterului geologic al zăcămintului (487); a) Studiul general al geologiei (487); b) Studiul geologiei zăcămintului (487); c) Material documentar (488); 3. Studiul caracte- rului fizic al zăcămintului (488); a) Condițiile inițiale de presiune și temperatură (488); b) Proprietățile fizice ale fluidelor din zăcămint (488); c) Proprietățile fizice ale rocii-colectoră (488); d) Materialul documentar și folosirea lui (488); 4. Studiul caracterului productiv al zăcămintului (489);			
e. Bazele hidrodinamice ale exploatării zăcămintelor de țiței	490		
1. Scopul și condițiile de aplicare ale hidrodinamice subterane (490); 2. Ecuațiile hidrodinamice de bază ale curgerii fluidelor în strat (491); 3. Principiile stabilirii amplasării raționale a galeriilor (492); 4. Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele liniare (493); a) Zăcămintele liniare cu regimul cu împin- gere de apă (493); b) Amplasarea rațională a ga- leriilor în zăcămintele liniare cu regim de expansiune a zonei de gaze libere (493); c) Amplasarea rațională			

TABLA DE MATERII

XIII

	pag.		pag.
a) Zăcămintele liniare în regim cu împingere de apă sau a zonei de gaze libere sub presiuni constante (507);		rilor (526); b) Debitul zăcămintului (527); c) Numărul de sonde (527); d) Durata de exploatare (527); e) Debitul mediu zilnic al zăcămintului (527); f) Concentrarea rezultatelor calculelor hidrodinamice (528);	
b) Determinarea debitului zăcămintului circular cu debite-limită (508); 1) Zăcămintele cu regim de împingerea apei (508); 2) Zăcămintele cîrculare cu regim de expansiune a zonei de gaze libere (510); c) Determinarea debitului zăcămintelor ovale cu debite-limită (510);		g) Influența mărimii parametrilor zăcămintului asupra rezultatelor obținute (528); 4. Partea economică a proiectării complexe (530); a) Calcule preliminare (530);	
11. Determinarea duratei de exploatare a zăcămintelor (512); a) Metoda determinării (512); 12. Corecțiile calculelor hidrodinamice, pentru condițiile reale de exploatare (515); a) Imperfecția sondelor (515); b) Asimetria zăcămintului (515); c) Variația proprietăților fizice ale stratului productiv (515); f. Proiectarea operațiilor de menținere a presiunii de zăcămint	515	1) Stabilirea numărului de sonde productive în fiecare etapă de exploatare (530); 2) Stabilirea duratei fiecărei etape de exploatare (530); 3) Stabilirea volumului de lucrări pe etape de exploatare (530); 4) Stabilirea suprafeței care revine unor sonde (530); b) Calculul productivității muncii (531); 1) Munca depusă de muncitorii direcți la sondele în producție (531); 2) Munca depusă de muncitorii auxiliari și de salariații tehnico-administrativi la sondele în producție (532); 3) Munca depusă pentru forajul sondelor (532); 4) Productivitatea muncii (533); c) Calculul eficacității investițiilor (533). 1) Eficacitatea investițiilor totale (533). 2) Eficacitatea consumului de metal (533). d) Calculul prețului de cost (534). 1) Cheltuielile de întreținere (534); 2) Cheltuielile totale de exploatare și preț de cost (534); 3) Influența mărimii parametrilor zăcămintului asupra prețului de cost (535); e) Caracterul general al variației indicilor tehnico-economice în funcție de variantele de exploatare (535); 1) Productivitatea muncii și prețul de cost (535); 2) Eficacitatea investițiilor (535);	
1. Scopul operațiilor de menținere a presiunii de zăcămint (515); 2. Alegerea agentului motor (516); 3. Determinarea cantității agentului motor (516); 4. Numărul și gabaritul sondelor de injecție (517); a) Sonde de injecție de apă (517); b) Sonde de injecție de gaze (518); 5. Instalațiile necesare pentru operațiile de menținere a presiunii de zăcămint (518); a) Sonde (518); b) Instalații pentru injectarea apei (519); 1) Alimentarea cu apă (519); 2) Tratarea apei (519); 3) Injectarea apei (519); c) Instalații pentru injectarea gazelor (519); 1) Alimentarea cu gaze (519); 2) Injectarea gazelor (519); 6. Calcule (519); a) Calculele hidrodinamice (519); b) Calculul instalațiilor (520); c) Calculele de rentabilitate (520);		i. Proiectarea complexă a exploatării unui grup de zăcămintele	535
g. Bazele economice ale exploatării zăcămintelor de țifei	520	1. Principiile generale (535); 2. Repartizarea producției curente pe un grup de zăcămintele (537); k. Proiectarea operațiilor de recuperare secundară	538
1. Rolul factorului economic în exploatarea zăcămintelor (520);		1. Principii generale (538); a) Studiul zăcămintului (538); b) Condițiile de aplicabilitate (538); c) Alegerea agentului motor (539); 2. Spălarea stratului cu apă (539); a) Sistemele principale de amplasare a sondelor (539); 1) Sistemul liniar (539); 2) Sistemul în cinci puncte (539); 3) Alegerea sistemului de amplasare a sondelor (540); b) Injecția de apă cu debit constant (540); c) Injecția de apă cu presiunea diferențială constantă (541); d) Spălarea stratului de țifei printr-un singur front (541); e) Instalațiile necesare spălării cu apă a stratului (541); 3. Spălarea stratului cu gaze (542); a) Sistemele de amplasare a sondelor (542); b) Determinarea cantității gazelor de injectat (542); c) Durata operației de spălare cu gaze (542); d) Instalațiile necesare spălării cu gaze a stratului (542); 4. Bazele economice ale proiectării operațiilor de recuperare secundară (542); a) Principiile generale (542); b) Productivitatea muncii (543); c) Prețul de cost (543).	
2. Productivitatea muncii (520); a) Noțiunea și elementele componente (520); b) Munca depusă de muncitorii direcți la sondele în producție (520); c) Munca depusă de muncitorii auxiliari la sondele în producție (521); d) Munca depusă de salariații tehnico-administrativi la sondele în producție (521); e) Munca depusă pentru forajul sondelor (521); 3. Eficacitatea investițiilor (523); a) Investițiile generale (523); b) Mijloacele de bază pentru extracție (523); c) Forajul sondelor (524); d) Investițiile de metal (524); e) Calculul eficacității investițiilor (524); 4. Prețul de cost (524); 5. Valorile indicilor tehnico-economi pentru industria de petrol din R.P.R. (525); a) Productivitatea muncii (525); 1) Munca depusă de muncitorii direcți la sondele în producție (525); 2) Munca depusă de muncitorii auxiliari și salariații tehnico-administrativi, la sondele în producție (525); 3) Munca depusă pentru forajul sondelor (525); b) Investițiile (525); c) Cheltuielile de exploatare (525); 6. Domeniul de valabilitate al indicilor tehnico-economi (525);		C. Exploatarea rațională a zăcămintelor de gaze	543
h. Proiectarea complexă a exploatării zăcămintelor de țifei	525	a. Calculul rezervei de gaze (543). 1. Metoda volumetrică (543); 2) Metoda declinului de presiune (543). b. Bazele hidrodinamice ale exploatării zăcămintelor de gaze	544
1. Principiile generale ale proiectării complexe a exploatării unui zăcămint de țifei (525). 2. Datele unui exemplu concret de proiectare (526); a) Caracterul zăcămintului (526); b) Variantele de exploatare care se vor analiza (526); 3. Partea hidrodinamică a proiectării complexe (526); a) Amplasarea rațională a rindu-		1. Condițiile de epuizare ale zăcămintelor de gaze (544); 2. Regimurile zăcămintelor de gaze (545); a) Generalități (545); b) Regimul cu împingere de apă (545); c) Regimul de expansiune a gazelor (545); d)	

XIV

TABLA DE MATERII

	<u>pag.</u>	<u>pag.</u>
Regimurile mixte (545); 3. Amplasarea sondelor (545); a) Amplasarea uniformă (545); b) Amplasarea în baterie (546); c) Alegerea sistemului de amplasare (546); 4. Regimul tehnologic al sondelor (546); a) Curgerea radială a gazelor în strat, spre sonde (546); b) Fixarea debitului sondelor de gaze (548); 1) Metoda debitului liber (548); 2) Metoda vitezei-limită de filtra- ție (548); 5. Distribuția presiunii în zăcămintele de gaze (549); Exemplul nr. 1 (550); 6. Ritmul de extracție la zăcămintele de gaze (551); a) Principiile generale (551); b) Extracția cu debit constant (551); 1) Variația în timp a numărului de sonde (551); 2) Variația în timp a celorlalți parametri ai exploatării (552); c) Extracția cu numărul de sonde constant (553); 1) Etapa cu presiunea de zăcămint ridicată (553); 2) Etapa cu presiunea de zăcămint scăzută (553); 3) Etapa de epuizare a zăcămintului (554); d) Exemplul nr. 2 (554); 1) Condițiile problemei (554); 2) Parametrii fici ai zăcămintului, (555); 3) Perioada debitului constant (555); 4) Perioada cu numărul de sonde constant (556); 7. Rolul presiunii sondelor în tran- sportul gazelor extrase (559); 8. Ordinea de săpare a sondelor la exploatarea zăcămintelor de gaze (560); a) Zăcămintă cu un singur orizont gazeifer (560); b)		
Zăcămintă cu mai multe orizonturi gazeifere (561); c. Bazele economice ale exploatării zăcămintelor de gaze		561
1. Generalități (561); 2. Productivitatea muncii (561); a) Munca depusă de muncitori la extracție (561); b) Munca depusă de personalul tehnico-administrativ a extracție (561); c) Munca depusă pentru forarea sondelor (562); d) Determinarea productivității muncii (562); 3. Prețul de cost (562); a) Cheltuielile de întreținere (562); b) Amortizarea investițiilor (563); c) Determinarea prețului de cost (563); d. Bazele proiectării complexe a exploatării zăcămin- telor de gaze		563
1. Cuprinsul unui proiect complex (563); 2. Studiul caracterului unui zăcămint de gaze (563); a) Studiul caracterului geologic al zăcămintului (564); b) Studiul caracterului fizic al zăcămintului (564); 1) Condițiile inițiale de presiune și temperatură (564); 2) Proprie- tățile fluidelor din zăcămint (564); 3) Proprietățile fizice ale rocii-colectoare (564); c) Studiul caracterului productiv al zăcămintului (564); 3. Partea hidrodi- namică a proiectului (564); 4. Partea economică a proiectului (565); 5. Repartizarea debitului planificat pe mai multe zăcămintă (565);		

In cadrul colecției de manuale inginerești editate de Editura Tehnică, seria în care se încadrează Manualul Inginerului Petrolist poartă numărul de ordine 4. Numărul de ordine al seriei este urmat de numărul de ordine al volumului. FORAREA SONDELOR DE ȚIȚEI ȘI GAZE este tratată în trei volume cu numerile de ordine 41, 42 și 43 iar EXPLOATAREA ZĂCĂMINTELOR DE ȚIȚEI ȘI GAZE este tratată tot în trei volume cu numerile de ordine 44, 45 și 46.

CAPITOLUL I

HIDRAULICA GENERALĂ

A. GENERALITĂȚI ASUPRA
FLUIDELOR

a. Noțiuni generale

Fluidele se disting de solide prin ușurința cu care moleculele se deplasează, datorită lipsei lor de coeziune.

Lichidele își schimbă forma, datorită unei forțe infinite de mici, dacă această forță acționează un timp suficient.

Într-un lichid în echilibru, rezistența la o schimbare de formă este nulă.

Lichidele sînt greu compresibile, trebuind să fie supuse la presiuni foarte mari, pentru micșorări neînsemnate de volum. La presiuni mari, apa nu se poate comprima într-o măsură sensibilă (la 1 000 at apa își micșorează volumul cu 5%).

Coeziunea fiind neglijabilă, eforturile interioare nu sînt decît compresii, tensiunile (pre-

siunile) fiind peste tot perpendiculare pe secțiune.

De aici rezultă compresibilitatea mică și deformarea mare a lichidelor.

Dacă se neglijează greutatea lichidului, tensiunile (presiunile) sînt aceleași în toate direcțiile.

În teoria echilibrului, interesează numai starea de repaus (sau de mișcare lentă), în care rezistența la schimbarea formei este egală cu zero. Așadar, se poate da următoarea definiție a stării lichidului: într-un lichid în echilibru, rezistența, la schimbarea de formă, este nulă.

Gazele se deosebesc de lichide prin aceea că se pot reduce la un volum mai mic, cu presiuni crescînd invers proporțional cu volumul la care se reduc.

Totodată dacă se oferă gazelor un volum mai mare, ele vor umple uniform noul spațiu, presiunea scăzînd proporțional cu creșterea volumului.

Tabela 1. Greutatea specifică γ , masa specifică ρ , viscozitatea dinamică η și viscozitatea cinematică ν a apei, la diferite temperaturi

	0°	10°	20°	40°	60°	80°	100°
γ (kg/m ³)	1000	1000	998	992	983	972	958
ρ (kgs ³ /m ⁴)	101,9	101,9	101,7	101,1	100,2	99,1	97,85
$10^6 \eta$ (kgs/m ²)	182	133	102	66,5	47,9	36,3	28,8
$10^6 \nu$ (m ² /s)	1,72	1,31	1,01	0,658	0,478	0,366	0,295

Tabela 2. Greutatea specifică γ , masa specifică ρ , viscozitatea dinamică η și viscozitatea cinematică ν a aerului, la presiunea barometrică de 760 mm col. Hg și la diferite temperaturi

	-20°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	200°	500°
γ (kg/m ³)	1,40	1,29	1,20	1,12	1,06	1,00	0,95	0,746	0,393
ρ (kgs ³ /m ⁴)	0,142	0,132	0,123	0,115	0,105	0,102	0,096	0,076	0,040
$10^6 \eta$ (kgs/m ²)	1,65	1,75	1,85	1,95	2,040	2,13	2,22	2,66	3,868
$10^6 \nu$ (m ² /s)	11,60	13,30	15,1	16,90	18,9	20,9	23,1	35,0	96,7

Tabela 3. Greutatea specifică γ , masa specifică ρ , viscozitatea dinamică η și viscozitatea cinematică ν a aburului, la presiunea atmosferică și la diferite temperaturi

	100°	150°	200°	250°	300°	350°	400°	450°	500°
γ (kg/m ³).....	0,598	0,524	0,467	0,421	0,384	0,353	0,326	0,304	0,284
ρ (kg/m ³).....	0,061	0,053	0,048	0,043	0,039	0,036	0,033	0,031	0,029
$10^6 \eta$ (kg/m ²).....	1,296	1,486	1,679	1,875	2,071	2,267	2,468	2,668	2,87
$10^6 \nu$ (m ² /s).....	21,27	27,88	35,30	43,65	52,80	63,0	74,20	86,1	99,1

Tabela 4. Compararea unităților de presiune

	at	torr	At	bar	pound/sq. inch
at.....	1	735,56	0,96784	0,9806	14,2233
1 000 torr.....	1,35951	1000	1,31579	1,33322	19,3371
Atm.....	1,03323	760	1	1,01325	14,6959
1 bar.....	1,01972	750,062	0,98692	1	14,5035
10 lb/sq. inch (lire/tol ²).....	0,70307	517,15	0,6804	0,68948	10

b. Capilaritatea și tensiunea superficială

Eforturile interioare care acționează într-un lichid, la contactul lichid-lichid, lichid-solid, lichid-gaz, tind să micșoreze suprafața de contact (tensiunea superficială).

Apa urcă între două plăci care se află la distanța a sau în tuburi cu raza a , la înălțimea

Viteza v de propagare a undelor sonore într-un mediu cu densitatea ρ este:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \beta}} \quad (2)$$

v variază cu ρ , deci practic cu temperatura și presiunea fluidului.

Tabela 5. Tensiunea superficială la contactul a două fluide

Fluidele în contact	apă aer	mercur aer	alcool aer	untdelemn aer	untdelemn apă	alcool apă
(g/cm).....	0,0770	0,4700	0,0258	0,0327	0,0210	0,0023

$h = \frac{15}{a}$ mm, luind forma unui menisc concav

în sus. Alcoolul urcă la înălțimea $h = \frac{5}{a}$, și

soluolul, la $h = \frac{6,5}{a}$.

Tensiunea superficială τ , provocată de eforturile de coeziune și care se găsește în planul suprafeței de contact ale fluidelor, depinde ca valoare de natura celor două fluide.

c. Elasticitatea și compresibilitatea

În hidrodinamică lichidele se tratează în general ca incompresibile, cu excepția cazurilor când intervin mase mari de fluid, presiuni mari sau compresibilități deosebite (datorită eventual gazelor dizolvate în fluid).

Coeficientul de compresibilitate este:

$$\beta = \frac{1}{E}, \quad (1)$$

E fiind modulul de elasticitate.

Tabela 6. Variația vitezei v de propagare a undelor sonore, în cazul apei la diferite temperaturi

t°C	3,9	13,7	25,2
v (m/s)	1399	1437	1457

Tabela 7. Variația coeficientului de compresibilitate (β) și coeficientului de elasticitate E al apei pentru presiuni până la 200 atmosfere, în funcție de temperatură

Temperatura	β	E
0°	$52 \cdot 10^{-10} \left(\frac{m^2}{kg} \right)$	19 231 kg/cm ²
20°	$49 \cdot 10^{-10} \left(\frac{m^2}{kg} \right)$	20 408 kg/cm ²

La presiunea de 6 600 at coeficientul de compresibilitate al apei corespunde cu $\beta = 30 \cdot 10^{-10}$. Pentru fiecare creștere de temperatură cu 10°, β scade cu 2,3%.

Gazele perfecte satisfac ecuația caracteristică:

$$pv = RT.$$

Această ecuație provine din legile lui Boyle-Mariotte și Gay-Lussac: $pv = p_0 v_0 (1 + \alpha t^\circ)$, în care $\alpha = \frac{1}{273^\circ}$ reprezintă coeficientul de

dilatație cubică al gazului, iar $R = \frac{p_0 v_0}{273^\circ}$, având dimensiunile metri/grad, deoarece p_0 este dat în kg/m^2 , $v_0 = \frac{V_0}{G_0}$ (m^3/kg) și $\alpha = \frac{1}{\text{grad}}$.

Pentru 1 kilomol, adică pentru greutatea G_m (kg), ecuația se scrie: $pvG_m = RG_m T$ sau $pV_m = R_m T$, în care $R_m = RG_m = 847,9 \text{ kgm/kmol grad}$, care este o constantă universal valabilă la toate gazele.

Presiunea tehnică se măsoară în kg/m^2 sau în atmosfere tehnice ($1 \text{ at} = 1 \text{ kg/cm}^2$), iar temperatura absolută este dată de $273^\circ + t^\circ$ (în grade Celsius).

Dacă un gaz corespunde ecuației $pv = RT$, se spune despre acest gaz că este un gaz perfect, în timp ce gazele care au abateri de la această lege se numesc gaze reale.

Pentru gazele reale există relația Van der Waals, în care $p = \frac{R_m T}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2}$ și în care a este o constantă a gazelor și b - volumul spre care tinde V_m , la presiuni foarte mari.

Dacă se notează cu:

L - lucrul mecanic al unui kilogram de gaz;

$Q \left(\frac{\text{cal}}{\text{kg}} \right)$ - căldura consumată pentru un

kilogram de gaz:

$\varepsilon' = \frac{V_2}{V_1}$ - gradul de compresiune, în urma

unui proces izotermic, $\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$.

Lucrul mecanic este $L = RT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) =$

$= RT \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$ sau $L = p_1 v_1 \ln \varepsilon$.

Considerind $A = \frac{1 \text{ kcal}}{427 \text{ kgm}}$ (echivalentul caloric al lucrului mecanic) se ajunge la:

$$Q = ART \ln \frac{V_2}{V_1} = AL. \quad (3)$$

La o compresiune izotermă se consumă deci echivalentul lucrului mecanic AL , iar la o expansiune se dezvoltă un lucru mecanic $AL = \frac{L}{427}$. La un proces adiabatic, fără schimb de căldură ($Q = \text{const.}$ sau $dQ = 0$), consumul de energie interioară la o expansiune se trans-

formă integral în lucru mecanic, deoarece: $C_v dT + A p dv = 0$.

Întrucît $pv^n = p_0 v_0^n = \text{const.}$, rezultă:

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

și

$$L = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right] = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (4)$$

Dacă C este căldura introdusă pentru ridicarea temperaturii unui kilogram de gaz cu un grad rezultă expresia exponentului politropic

$n = \frac{C - C_p}{C - C_v}$ (diferit de κ adiabatic), care este dat de:

$$\kappa = \frac{C_p}{C_v} =$$

$= \frac{\text{căldură specifică, la presiune constantă}}{\text{căldură specifică, la volum constant}}$

Tabela 8. Exponentul adiabatic κ pentru câteva gaze uzuale

Gaz	κ
Aer, gaz, oxigen, azot.....	$\kappa = 1,405$
Metan	$\kappa = 1,310$
Bioxid de carbon	$\kappa = 1,300$
Hidrogen	$\kappa = 1,407$
Heliu	$\kappa = 1,660$

d. Absorbția gazelor

Lichidele absorb gazele la creșteri de presiune, și le eliberează în aceeași măsură la scăderea presiunii.

Temperatura are și ea un rol în absorbția gazelor cum se vede în tabela 9.

Tabela 9. Cantitățile de gaze absorbite de 1 m³ de apă distilată, la 760 mm Hg și la diferite temperaturi

Temperatura t°	0°	20°	100°
Aer	0,029	0,019	0,011
Azot	0,026	0,017	0,0105
Oxigen	0,053	0,034	0,0185
Hidrogen	0,023	0,020	0,018
Acid carbonic ..	1,870	0,960	0,260
Clor	5,00	2,500	0,00
Amoniac	1250	700	0,00

Oxigenul (O) și azotul (N) sînt absorbite de apă, corespunzător coeficientului de absorbție al fiecărui gaz separat, adică volumului din aceste gaze, dizolvat în apă sub presiunea de o

atmosferă (760 mm col. mercur) și la temperatura t° care este respectiv:

$$\alpha_O = 0,04115 = [0,00109 t + 0,00002256 t^2];$$

$$\alpha_N = 0,020346 - 0,000538 t + 0,000011156 t^2.$$

Coefficientul de absorbție se deduce din legea amestecurilor. La un mediu compus din mai multe gaze, dizolvarea are loc aproximativ proporțional cu presiunea pe care ar exercita-o fiecare dintre ele, dacă ar ocupa singure același spațiu. Deci, în cazul aerului, volumele de oxigen și de azot, în soluție, vor fi proporționale cu presiunile parțiale respective:

$$P_O = 0,2096 \text{ at};$$

$$P_N = 0,7904 \text{ at},$$

deoarece 1 vol aer = 0,2098 vol O + 0,7904 vol N.

Deci, coeficientul de absorbție α_a , la 760 mm col. mercur, este:

$$\alpha_a = 0,2096 \alpha_O + 0,7904 \alpha_N,$$

și luând pe α_O și α_N la $t = 0^\circ$

$$\alpha_a = 0,024726.$$

Din cauza solubilității mai mari a oxigenului, aerul dizolvat în apă conține 34% oxigen și 66% azot, în loc de 21% și 79%, cum este în aer liber.

Dacă apa care curge conține aer dizolvat, la o scădere de presiune sub presiunea atmosferică se produce o degajare a oxigenului în stare născindă. Acest oxigen în stare născindă fiind foarte activ, atacă materialul feros și are ca efect corodarea rapidă a acestuia (cavitație).

Aceste scăderi de presiune se produc în cadrul curgerii, mai ales la coturi, la curburi de palete, la sifoane automate, la aspiratoare de turbine etc., unde viteza crește atât de mult uneori, încât presiunea scade sub presiune de vaporizare, producându-se fenomenul cavitației.

Tabela 10. Presiunea de vaporizare a apei, la diferite temperaturi

t°	0	10	20	30	40	60	80	100
p_v at.....	0,0062	0,0152	0,0238	0,0433	0,0752	0,2031	0,4828	1,033
p_v/γ col H ₂ O	0,062	0,152	0,238	0,433	0,752	2,031	4,828	10,33

B. HIDROSTATICA

a. Echilibrul static al lichidelor și al gazelor, ținând seamă de greutate

Prin mg se înțelege greutatea unei mase m , considerând accelerația gravitației $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Pentru masa unității de volum s-a introdus noțiunea de masă specifică ρ . O cantitate de lichid oarecare de volum V și de masă specifică ρ are o masă ρV și o greutate $g\rho V$.

Produsul $g\rho = \gamma$ se numește greutate specifică.

1. Considerind un cilindru de lichid cu greutatea specifică omogenă (fig. 1) distribuția presiunii în acest cilindru reiese din relația:

$$\gamma h S + p_1 S = p_2 S,$$

adică:

$$p_2 - p_1 = \gamma h. \quad (5)$$

Deci, presiunea crește proporțional cu adâncimea, și rămâne constantă într-un plan orizontal.

2. Dacă greutatea specifică a unui lichid este neuniformă distribuția presiunii apare sub o formă diferențială:

$$dp = -\gamma dz,$$

și întrucât γ este funcție de înălțimea z

$$p = p_0 - \int_0^z \gamma \cdot dz. \quad (6)$$

Pentru gaze (după formula barometrică):

$$p = p_1 \exp\left(\frac{z_1 - z}{H_0}\right) \quad *) \quad (7)$$

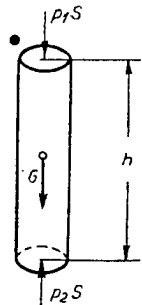


Fig. 1. Distribuția presiunii într-un cilindru de lichid de greutate specifică omogenă.

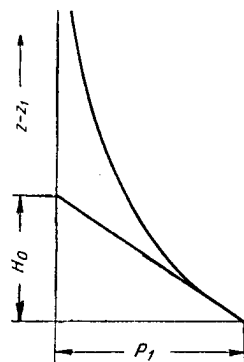


Fig. 2. Variația presiunii în funcție de înălțime la un fluid compresibil.

Această repartitie a presiunii (fig. 2) are loc într-un mediu cu temperatura constantă.

*) Prin notația $\exp(u)$ se înțelege e^u

b. Principiul lui Pascal

Presiunea exercitată asupra unui lichid aflat în echilibru se transmite cu aceeași mărime în toată masa lichidului și în toate direcțiile, dacă se face abstracție de greutatea lichidului.

c. Ecuațiile fundamentale ale lui Euler

Un paralelipiped elementar $dx \, dy \, dz$ se află în echilibru, sub acțiunea forțelor unitare de masă și a forțelor de presiune. Forțele de masă au rezultanta:

$$dF = \sqrt{dF_x^2 + dF_y^2 + dF_z^2}$$

și raportând componentele la unitatea de masă se obțin componentele forței unitare de masă:

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{dF_x}{\rho \, dx \cdot dy \cdot dz}; \\ f_y &= \frac{dF_y}{\rho \, dx \cdot dy \cdot dz}; \\ f_z &= \frac{dF_z}{\rho \, dx \cdot dy \cdot dz} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Considerând că pe cele trei direcții asupra elementului de fluid lucrează și forțele date de presiunile p , și ținând seamă de variația acestor presiuni, se obțin ecuațiile lui Euler pentru toate direcțiile:

$$f_x = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad f_y = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}; \quad f_z = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (9)$$

Prin înmulțirea cu elementul diferențial și prin adunare:

$$\begin{aligned} \rho (f_x \, dx + f_y \, dy + f_z \, dz) &= \\ &= \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz = dp. \end{aligned} \quad (10)$$

În cazul lichidelor puțin compresibile, ρ este constant și după o nouă derivare parțială:

$$\frac{\partial f_x}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x \cdot \partial y}; \quad \frac{\partial f_y}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x \cdot \partial y}, \text{ etc.}$$

De aici se deduce că:

$$\frac{\partial f_x}{\partial y} = \frac{\partial f_y}{\partial x}; \quad \frac{\partial f_x}{\partial z} = \frac{\partial f_z}{\partial x}; \quad \frac{\partial f_y}{\partial z} = \frac{\partial f_z}{\partial y},$$

iar aceste trei ecuații condiționează existența unui potențial U , definit de

$$f_x = -\frac{\partial U}{\partial x}; \quad f_y = -\frac{\partial U}{\partial y}; \quad f_z = -\frac{\partial U}{\partial z} \quad (11)$$

Se spune, deci, că un fluid este în echilibru static dacă forțele exterioare provin dintr-un potențial, prin derivări parțiale.

Diferențiala totală a presiunii este:

$$dp = \rho \left(\frac{\partial U}{\partial x} dx + \frac{\partial U}{\partial y} dy + \frac{\partial U}{\partial z} dz \right) = -\rho dU,$$

care, prin integrare dă: $p = -\rho U + C$. La nivelul de referință $p_0 = -\rho U_0 + C$, sau

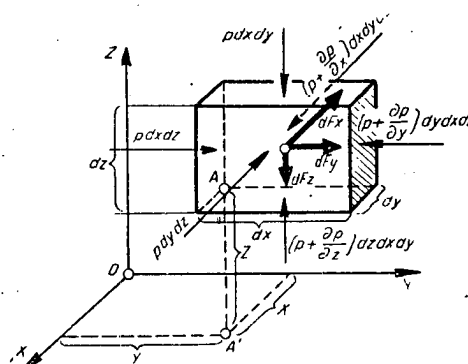


Fig. 3. Forțele care acționează asupra unui volum elementar de fluid în cazul echilibrului hidrostatic.

$C = p_0 + \rho U_0$, și de aici rezultă că presiunea într-un punct este:

$$p = p_0 - \rho (U - U_0). \quad (13)$$

Dacă pentru fiecare punct corespunde o presiune p , bine definită, apare evident că unind toate punctele de aceeași presiune se va obține o suprafață izobară sau echipotențială.

1. Lichid în câmpul gravitațional static.

Aici $f_x = 0$, $f_y = 0$, iar $f_z = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} = -g$.

Ținând seama de relația $\gamma = \rho g$, echilibrul hidrostatic se reduce la $dp = -\gamma dz$, sau $p = C - \gamma z$.

Dacă $C = p_0$ și $h = -z$, rezultă că $p = p_0 + \gamma h$ și dacă se ține seamă de potențial,

$f_z = -\frac{dU}{dz} = -g$ se obține $dU = g dz$ și

prin integrare $U = U_0 + gz$; deci, suprafețele echipotențiale (suprafețele izobare) sînt plane orizontale paralele.

2. Lichid în câmpul gravitațional radial.

Aici se consideră $f_r = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = -g$, iar diferențiala presiunii $dp = -\gamma dr$; dacă R este raza pămîntului, prin integrare se obține

$$p = p_0 + \gamma (R - r),$$

adică suprafețele izobare sînt sfere concentrice.

3. Lichid în rotație uniformă în jurul unui ax. Dacă un vas de formă cilindrică, în care se găsește apă la nivelul h , se rotește cu o viteză constantă ω în jurul axei z , atunci, în afară de accelerația gravitației apar componentele accelerației centrifugale de inerție.

Deci:

$$f_x = x\omega^2; f_y = y\omega^2; f_z = -g;$$

$$dp = \rho(x\omega^2 dx + y\omega^2 dy - g dz).$$

Prin integrare se obține $p = \rho \left(\frac{r^2 \omega^2}{2} - gz \right) + C$, având următoarele expresii pentru punctele P, la suprafața nivelului și P'

$$p = \rho \left(\frac{r^2 \omega^2}{2} - gz \right) + C$$

și

$$p' = \rho \left(\frac{r'^2 \omega^2}{2} - gz' \right) + C$$

încît $p' - p = \rho g(z - z') = \gamma h$.

Rezultă că presiunea în orice punct $p' = p + \gamma h$ depinde numai de adâncimea h , sub suprafața liberă. Suprafețele echipotențiale apar sub forma $\frac{r^2 \omega^2}{2} - gz = \text{const.}$, de unde rezultă că suprafețele libere sînt niște paraboloizi de revo-

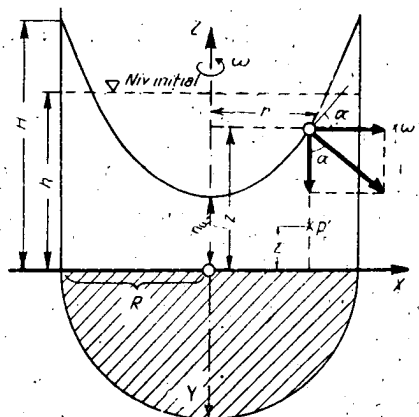


Fig. 4. Vas cilindric cu lichid în rotație.

luție, care în planul xz apar ca parabole de forma $\frac{x^2 \omega^2}{2} = gz + \text{const.}$ Nivelul maxim al suprafeței libere la perete este H , iar în axul vasului nivelul h_0 reprezintă nivelul minim.

d. Suprapresiune și linie piezometrică

La suprafața apei și pe pereții vasului din fig. 5 se consideră că p_0 este presiunea atmosferică, care are la nivelul mării, la 0° și 760 mmHg, o valoare $p_0 = 1,0332 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ ata}$.

Considerind un punct P (fig. 5) din lichid, la distanța h (m), sub nivelul liber, presiunea absolută în acest punct va fi $p = p_0 + \gamma h$, în care γh este suprapresiunea.

Linia piezometrică reprezintă locul geometric al suprapresiunilor γh ; aceasta face cu verticala unghiul β . ($\text{tg } \beta = \gamma$).

Pentru peretele vertical AB rezultă triunghiul piezometric ABC, iar pentru un perete

încîlat ab, suprapresiunile variază după un triunghi identic abc.

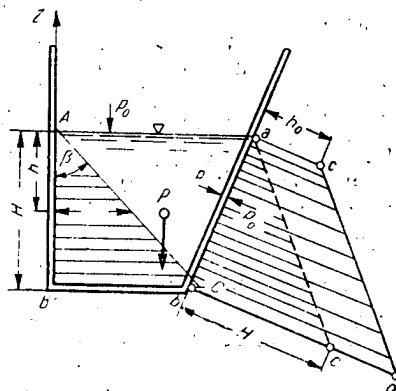


Fig. 5. Distribuția presiunii exercitate de un lichid asupra pereților unui vas.

Pe fundul vasului apasă suprapresiunea γH sau presiunea absolută $p = p_0 + \gamma H$, care, în cazul cînd fundul este orizontal, este aceeași pe toată suprafața.

e. Măsurarea presiunilor

Măsurarea presiunilor se face cu aparate speciale ca: piezometre, manometre și manografe.

1. Manometrul cu un braț cu apă (fig. 6) măsoară presiuni mici și se montează astfel

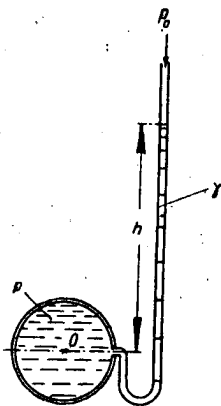


Fig. 6. Manometru cu un braț.

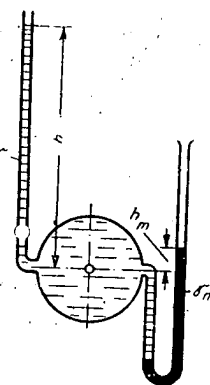


Fig. 7. Manometru cu două brațe.

încît înălțimea piezometrică să fie raportată la axa conductei. Ecuația de echilibru între presiunea din vas și presiunea atmosferică se poate scrie

$$p = p_0 + \gamma h$$

2. Manometrul cu mercur cu două brațe (fig. 7). La acest manometru se întrebuințează mercurul în locul apei și este utilizat

la măsurarea presiunilor mai mari. Adeseori contactul dintre cele două lichide se aranjează să fie la cota punctului unde se măsoară presiunea. Ecuația de echilibru este

$$\gamma h = \gamma_m h_m$$

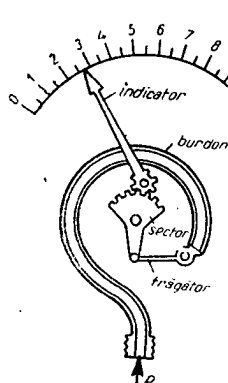


Fig. 8. Manometru cu arc.

creșterea presiunii, acest arc tinde să se îndrepte și răsucesce sectorul cu roata dințată.

4. Manometru diferențial. Acest tip de manometru se utilizează pentru măsurarea pre-

3. Manometru cu arc (fig. 8) este un recipient metalic, care se deformează sub acțiunea presiunii interioare, deformarea fiind funcție de această presiune. Aceasta este amplificată și valoarea presiunii este arătată pe o scară, de către un ac indicator.

Manometru cu burdon constă dintr-un tub arcuit de alamă și cu secțiunea eliptică; prin

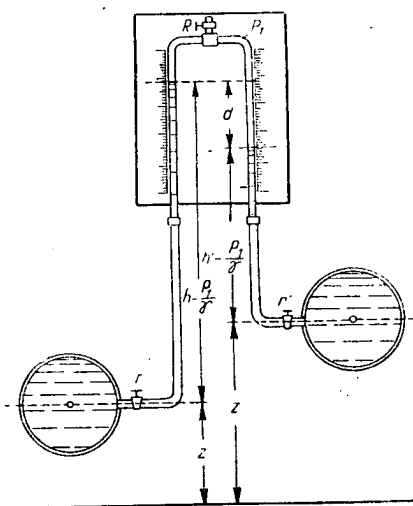


Fig. 9. Manometru diferențial.

siunilor din două conducte (fig. 9). Prin deschiderea robinetelor r și r' lichidul se urcă în cele două ramuri, fără să umple complet manometru.

Manometru diferențial servește la măsurarea presiunilor mari; aerul închis în tub nefiind în legătură cu atmosfera va fi supus la presiunea p_1 și lichidul va atinge înălțimi mai mici decât h și h' .

Înălțimile vor fi respectiv $h - \frac{p_1}{\gamma}$ și $h' - \frac{p_1}{\gamma}$ și dacă nivelurile piezometrice astfel stabilite sînt prea jos și nu apar pe tubul de sticlă, se deschide R , pînă ce se deplasează în sus coloanele de lichid, prin micșorarea lui p_1 , păstrînd diferența de nivel.

Din fig. 9 rezultă

$$h - \frac{p_1}{\gamma} + z = h' - \frac{p_1}{\gamma} + z' + d,$$

$$\text{sau } h - h' = d + z' - z,$$

Dacă axele conductelor se găsesc la aceeași cotă:

$$h - h' = d$$

f. Forța de presiune exercitată de un lichid pe pereți

1. Pereți plani înclinați. Dacă peretele este înclinat față de orizontală, cu unghiul α c

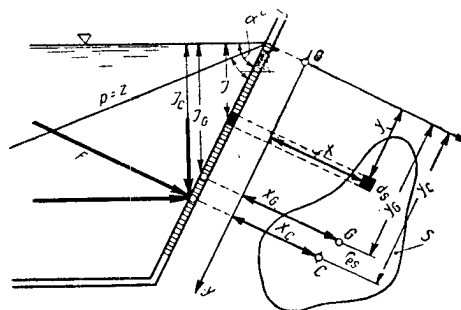


Fig. 10. Forțele de presiune pe pereți plani.

în fig. 10, pe un element de suprafață dS fixat prin coordonatele x și $y = \frac{z}{\sin \alpha}$ supra-

presiunea este $p = \gamma z$, iar forța pe suprafața elementară dS este $dF = \gamma z dS$.

Prin integrare pe întreaga suprafață S se obține corespunzător forța

$$F = \gamma z_G S$$

z_G fiind adîncimea centrului de greutate G față de suprafața liberă a fluidului.

Pentru a afla poziția centrului de presiune $C(x_c, y_c)$ se scriu momentele față de cele două axe și știind că $I_{xy} = \int xy ds$ este momentul de inerție centrifugal, față de axele $ox oy$, se obține:

$$X_c = \frac{I_{xy}}{\gamma_G S} \quad Y_c = \frac{I_x}{\gamma_G S} \quad (15)$$

în care ținînd seama că $I_x = I_G + \gamma_G^2 S$ este momentul de inerție al suprafeței S față de axa Ox , se poate scrie:

$$y_c = \frac{I_x}{S y_G} = \frac{I_G + \gamma_G^2 S}{S y_G} = y_G + \frac{I_G}{S y_G} \quad (16)$$

În cazul unui perete plan, centrul de presiune C se află situat totdeauna mai jos decât centrul de greutate G și se apropie de G pe măsura cufundării suprafeții în lichid; distanța între ele:

$$e = y_c - y_G = y_G + \frac{I_G}{S y_G} - y_G = \frac{I_G}{S y_G} \quad (17)$$

Cu cât y_G crește (deci cu cât peretele plan este cufundat mai mult în lichid) distanța e scade și devine zero când $y_G = \infty$.

2. Forța de presiune pe fundul vaselor. Pe suprafața orizontală S_0 a fundului unui vas forța de presiune apare sub forma

$$F_0 = \gamma S_0 h \quad (18)$$

F_0 este deci funcție de h și S_0 fără a depinde de loc de forma vasului.

Din fig. 11 se observă, ca o consecință a acestei relații, că indiferent de forma vasului, forța F_0 depinde numai de suprafața fundului (paradoxul hidrostatic).

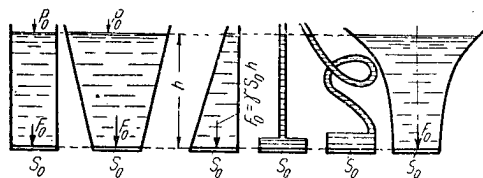


Fig. 11. Forțele de presiune pe vase de forme diferite și cu fundul de aceeași secțiune.

Ținând seama că $Q_v =$ greutatea rezervorului gol, al cărui volum este v , fundația rezervorului se va dimensiona, la o încărcare

$$p = \frac{Q_v + \gamma h S_0}{S_0}$$

3. Presiunea lichidului pe suprafețe în spațiu. Dacă peretele are o formă oarecare în spațiu, se descompune suprafața în trei proiecții, pe cele trei plane, ale căror forțe hidrostatice se determină în modul cum s-a arătat la pereții plani.

Cele trei componente se pot reduce la o rezultantă atunci când direcțiile acestora sînt concurente.

Componenta verticală este egală cu greutatea volumului coloanei de lichid dintre suprafața dată și suprafața liberă.

g. Forțele de presiune exercitate asupra corpurilor cufundate în lichid

Asupra corpurilor cufundate în lichide sau gaze, acționează numai componenta verticală a forței de presiune ce se exercită pe suprafața corpului în contact cu lichidul (gazel), deoarece componentele orizontale se anulează reciproc.

Pe partea superioară a corpului acționează de sus în jos forța $F_1 = \gamma V_2$ (greutatea volumului hașurat oblic), iar pe partea inferioară forța ascensională $F_2 = \gamma V_2$ (greutatea volumului hașurat vertical). De aici se deduce că forța $P = F_2 - F_1 = \gamma (V_2 - V_1)$, adică greutatea volumului de apă deplasat (Arhimede).

În general F_1 , F_2 și G nu sînt situate pe aceeași verticală și atunci apare și cuplul $M = F_2 a_2 + F_1 a_1$, corpul răsucindu-se în jurul lui G , pînă ce F_2 coincide ca direcție cu F_1 .

La corpuri cu plan de simetrie vertical, G și P sînt în același plan, și după cum G este mai mare sau mai mic decât P , corpul se scufundă sau plutește.

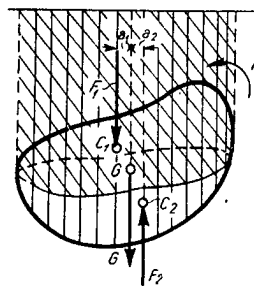


Fig. 12. Corp de formă oarecare scufundat în lichid.

h. Plutirea corpurilor

Un corp cu greutatea Q_0 , care acționează în centrul de greutate (baricentru) G , se numește plutitor, dacă nu se cufundă în întregime în apă. Planul AB este considerat plan de plutire, iar OD este axul de plutire.

Forța ascensională $P = \gamma V$ lucrează în C , iar C se numește centrul de carenă și volumul V de apă deplasat se numește carenă care poate varia între un minim și un maxim, după cum variază încărcătura vasului.

În poziție de echilibru, C și G se găsesc pe o aceeași verticală (axul de plutire) iar $G_0 = P = \gamma V$.

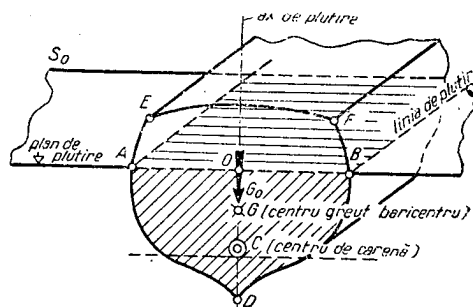


Fig. 13. Vas plutitor.

1. Stabilitatea transversală a corpurilor plutitoare. Dacă un corp plutitor se înclină cu un unghi α , sub acțiunea unui moment M_e , și revine la poziția de echilibru după încetarea acțiunii lui M_e , este în echilibru stabil.

Dacă încetînd acțiunea momentului M_e corpul se răstoarnă, echilibrul este labil, iar dacă în orice poziție corpul se află în echilibru, corespunde cazului de echilibru indiferent.

Față de vechiul plan de plutire AB , acest nou plan de plutire $A'B'$ se află sub un unghi α . Pe întreaga lungime a vasului apare o deplasare de volum de apă $\Delta V = \int \alpha x dS$, care produce în dreapta o forță ascensională $\Delta P = \gamma \Delta V \cong \gamma \alpha \int x dS$, iar în stînga, o forță $\Delta P'$ ce lucrează în jos. Aici $\Delta P'$ este identic cu ΔP , deoarece carena totală trebuie să fie aceeași pentru ambele plane AB și $A'B'$, plutitorul fiind astfel izocaren.

Forța $P = \gamma V$ se deplasează din C și C' și, în acest caz, $P(x'_1 + x'_2) = \Delta P'a'$ sau $\gamma V x' = \gamma \alpha \int x^2 ds = \gamma \alpha I_0$, în care $x' = x'_1 + x'_2$ și $I_0 = \int x^2 ds$. Pentru echilibru $x' = \alpha \frac{I_0}{V}$.

Metacentrul M reprezintă intersecția axului de plutire cu direcția lui P , și $MG = h_m$ reprezintă înălțimea metacentrică, iar $CG = a$.

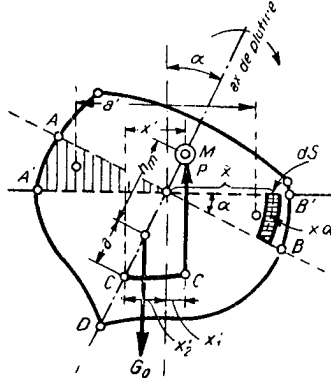


Fig. 14. Vas în secțiune transversală.

Dacă se ține seamă că unghiul α este mic, se scrie: $x' = (h_m + a) \sin \alpha \cong (h_m + a) \alpha$, care dă din expresia lui $x' \cong \alpha \frac{I_0}{V}$, valoarea

$$\text{lui } h_m = \frac{I_0}{V} - a.$$

Deci, echilibrul se poate defini astfel:

Dacă $h_m > 0$, metacentrul M este deasupra baricentrului G și atunci echilibrul este stabil.

Dacă $h_m = 0$, metacentrul M este identic cu baricentrul G și atunci echilibrul este indiferent.

Dacă $h_m < 0$, metacentrul M este sub baricentrul G și atunci echilibrul este labil.

2. Stabilitatea longitudinală a corpurilor plutitoare. Cele spuse la stabilitatea transversală rămân valabile și în acest caz.

Datorită unui moment exterior M_e poate apărea o înclinare longitudinală, numită tangaj.

Pentru a exista echilibru, trebuie ca $G_0 = P = \gamma V$ și momentul exterior care provoacă înclinarea să fie în echilibru cu momentul

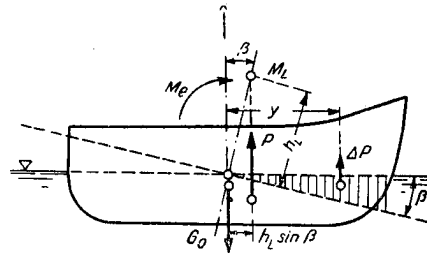


Fig. 15. Vas în secțiune longitudinală.

forței de plutire $Ph_L \sin \beta$, adică $M_e - \gamma V h_L \sin \beta = 0$.

Înălțimea metacentrică $h_L (GM_L)$ se calculează, ca și în cazul precedent, $h_L = \frac{I_L}{V}$, în care $I_L = \int y^2 dS$ față de axa de rotație.

Cum momentul de inerție longitudinal I_L este mult mai mare decât I_0 , atunci și h_L este mult mai mare decât h_m și deci momentul de redresare, în acest caz, este mult mai mare decât momentul transversal. În calcul, dacă echilibrul navei a fost studiat pentru cazul transversal și s-a găsit un echilibru stabil, cu atât mai mult va fi asigurată stabilitatea longitudinală.

C. CINEMATICA FLUIDELOR

a. Descrierea cinematică a fenomenului de curgere

Pentru studiul cinematic al fluidelor în mișcare nu se ține seamă de forțele care acționează asupra acestora.

Pentru a se descrie fenomenul de curgere se folosesc două metode: metoda lui Lagrange sau a lui Euler.

1. **Metoda lui Lagrange** consideră mișcarea unei particule în diferite momente, raportată la trei axe de coordonate fixe. $Oxyz$ și relațiile obținute sînt generalizate pentru întreg fluidul în mișcare.

În acest sistem se consideră o particulă de coordonate (x_0, y_0, z_0) , într-un moment inițial t_0 , și care trebuie să fie urmărită în momentele ulterioare ale descrierii traiectoriei.

Pentru a defini poziția particulei la un moment dat în timpul mișcării, se poate scrie:

$$\left. \begin{aligned} x &= x(x_0, y_0, z_0, t); \\ y &= y(x_0, y_0, z_0, t); \\ z &= z(x_0, y_0, z_0, t), \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

care duc astfel la cunoașterea traiectoriei oricărei particule.

Viteza se află din derivarea spațiului în raport cu timpul t , respectiv componentele vitezei, sînt:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} = v_x(x_0, y_0, z_0, t); \\ v_y &= \frac{dy}{dt} = v_y(x_0, y_0, z_0, t); \\ v_z &= \frac{dz}{dt} = v_z(x_0, y_0, z_0, t), \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

dx, dy, dz fiind deplasările elementare ale particulei, în timpul dt .

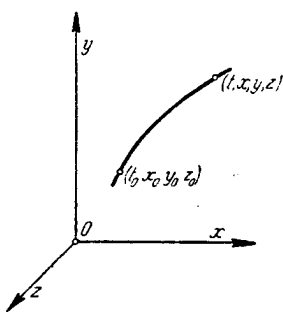


Fig. 16. Mișcarea unei particule de fluid în spațiu.

Accelerația se obține derivînd viteza în raport cu timpul, iar componentele acesteia vor fi

$$\left. \begin{aligned} J_x &= \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \\ J_y &= \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} \\ J_z &= \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

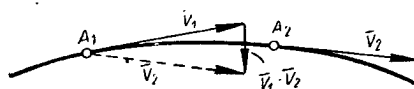


Fig. 17. Vitezele unei particule în două poziții consecutive.

2. Metoda lui Euler. În acest sistem se urmăresc într-un punct anumit, pentru diferite momente t , particulele de fluid ce trec prin punctul de observație. Aici, variabilele independente sînt x, y, z, t .

Vitezele particulelor ce trec prin punctul de observație sînt după fiecare punct următoarele:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v_x(x, y, z, t) = \frac{dx}{dt}; \\ v_y &= v_y(x, y, z, t) = \frac{dy}{dt}; \\ v_z &= v_z(x, y, z, t) = \frac{dz}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Accelerațiile se găsesc ca și în cazul de mai sus

$$\left. \begin{aligned} j_x &= \frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \\ &+ \frac{\partial v_x}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial v_x}{\partial x} v_x + \\ &+ \frac{\partial v_x}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_x}{\partial z} v_z + \frac{\partial v_x}{\partial t}; \\ j_y &= \frac{dv_y}{dt} = \frac{\partial v_y}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} v_y + \\ &+ \frac{\partial v_y}{\partial z} v_z + \frac{\partial v_y}{\partial t}; \\ j_z &= \frac{dv_z}{dt} = \frac{\partial v_z}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_z}{\partial y} v_y + \\ &+ \frac{\partial v_z}{\partial z} v_z + \frac{\partial v_z}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

La o mișcare staționară, vectorul viteză este constant în timp și deci derivatele sale parțiale, în raport cu timpul vor fi nule.

b. Noțiuni de curgere

Linia de curent este curba la care vectorul viteză rămîne permanent tangentă în timpul curgerii. Această linie este, la mișcări staționare, aceeași cu traiectoria descrisă de o particulă.

La mișcări plane ($v_z = 0$), ecuația diferențială a liniei de curent este:

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y}, \quad (25)$$

și punînd:

$$v_y dx - v_x dy = 0$$

se găsește — prin integrare — ecuația liniilor de curent $\psi = \text{const.}$ Debitul care se scurge între liniile $\psi = \psi_1$ și $\psi = \psi_2$ are valoarea $\psi_1 - \psi_2$, iar vitezele sînt

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Linia de curent, fiind învelitoarea tangențelor la direcțiile curentului, se poate scrie că produsul vectorial a doi vectori coliniari \vec{ds} și \vec{V} este egal cu zero, și

$$\vec{ds} \times \vec{V} = 0.$$

Cind linia de curent întâlnește un corp, (fig. 18), se desparte în A în două părți și se

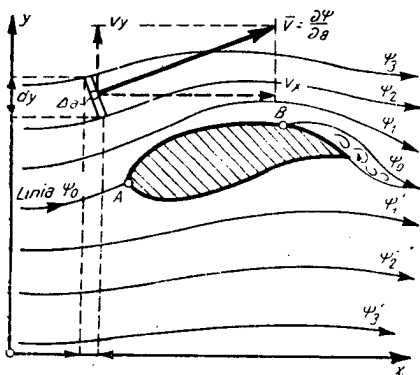


Fig. 18. Linile de curent ale unui fluid în mișcare și întâlnirea acestora cu un obstacol.

unește în B, după ocolirea corpului; punctul A se consideră punct de atac sau impact.

Dacă Δa este distanța dintre liniile de curgere (fig. 18) ψ_2 și ψ_3 , ale căreia proiecții pe axele de coordonate sînt dx și dy , atunci viteza $V = \frac{\partial \psi}{\partial a}$. Deci distanța dintre liniile de curgere

este invers proporțională cu viteza.

Proprietățile liniilor de curent sînt: 1) nu se pot întretaia; 2) nu pot lua naștere în fluid, deoarece liniile de curent vin de la infinit și pleacă la infinit; 3) liniile de curent se aștern pe un corp în mișcare.

Tubul de curgere este spațiul care cuprinde mai multe linii de curent, ce trece printr-o curbă închisă.

Firul de curgere este fluidul care curge prin tubul de curent.

Cîmpul vitezei reprezintă totalitatea liniilor de curgere. Există cîmp staționar, sau nestaționar, după felul curgerii.

Curgere staționară este aceea la care, în fiecare punct al spațiului, viteza nu variază cu timpul, în mărime și direcție; prin urmare, linia de curent se confundă cu traiectoria unei particule de fluid.

Curgerea nestaționară este aceea curgere la care intervin variații de viteză, în raport cu timpul, și la care linia de curent nu se confundă cu traiectoria unei particule de fluid.

c. Legea conservării materiei în mecanica fluidelor (legea continuității)

Masa unui fluid într-un sistem închis, fără izvoare și fără puncte de scurgere, nu se poate nici crea, nici distruge. În general, legea conti-

nuității se exprimă astfel: excesul de masă care intră sau care iese dintr-un volum, în unitatea de timp, este egal cu variația masei fluidului din elementul de volum respectiv.

Ecuatia generală a continuității. Considerînd un element de volum de fluid dx, dy, dz se scrie diferența dintre masa de fluid care intră și masa care iese.

De-a lungul axei Ox intră, în unitatea de timp, o masă $\rho \cdot v_x \cdot dy \cdot dz$ și iese

$$\left[\rho V_x + \frac{\partial}{\partial x} (\rho V_x) dx \right] dy dz$$

(fig. 19).

Diferența dintre masa ce intră și masa ce iese de-a lungul uneia dintre axe reprezintă tocmai excesul de masă,

$$-\frac{\partial (\rho V_x)}{\partial x} dx dy dz$$

Pe celelalte axe se obțin aceleași diferențe și pentru a avea constanța materiei, suma acestora trebuie să fie egală cu variația în unitatea de

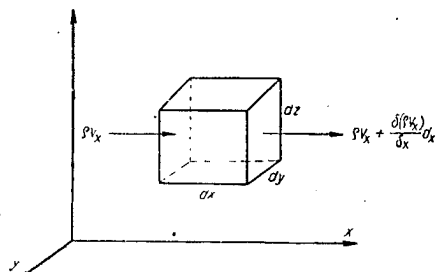


Fig. 19. Variația masei unui fluid în mișcare.

timp a masei conținute în elementul de volum, $\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz$.

Astfel se obține **ecuația generală a continuității**:

$$\frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (27)$$

care se referă la fluide compresibile, într-o curgere nestaționară.

Pentru o curgere staționară, ecuația devine:

$$\frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0. \quad (28)$$

La fluide incompresibile (cuprinzînd și lichidele care, pentru presiunile uzuale, sînt practic incompresibile), valoarea $\rho = \frac{Y}{g} = \text{const.}$

și ecuația continuității se poate scrie:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (29)$$

Aceste trei ecuații de mai sus se pot scrie vectorial sub următoarele forme:

Ecuația (27) devine:

$$\operatorname{div}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (30)$$

iar ecuația (28) se scrie:

$$\operatorname{div}(\rho \bar{v}) = 0.$$

Pentru un tub de curent cu secțiunea S , ecuația continuității este — pentru fluide compresibile:

$$\rho S v = \text{const},$$

adică

$$\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2 = \rho S v,$$

și pentru fluide incompresibile:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = S v = Q \quad (31)$$

D. DINAMICA FLUIDELOR INCOMPRESIBILE FĂRĂ FRECAR INTERIOARĂ (IDEALE)

Forțele care lucrează asupra fluidelor. Forțele care lucrează asupra unui fluid în mișcare sînt: forțe dependente de masă: greutatea și inerția; forțe dependente de diferențe de presiune și forțe dependente de frecarea interioară.

Pentru fluide ideale nu se iau în considerare forțele de frecare interioară. (Apa și aerul se pot trata ca fluide ideale, cu mici corecții).

a. Legea lui Bernoulli

Această lege exprimă constanța energiei.

Se consideră că asupra unui cilindru elementar de fluid (fig 20) de lungime ds și suprafața dS , lucrează forțele de masă și forțele provenite din diferențele de presiune.

$\rho \cdot dS \cdot ds \cdot g \cdot \cos \alpha$ este componenta forței dependente de masă în direcția curgerii, $\rho dS ds$ fiind masa volumului elementar de fluid de forma cilindrică.

$-\frac{\partial p}{\partial s} \cdot ds \cdot dS$ este diferența dintre cele două forțe de presiune ce acționează la capetele volumului elementar de fluid $p dS - \left(p + \frac{\partial p}{\partial s} \cdot ds\right) dS$, iar inerția este reprezentată prin masa \times accelerația:

$$\rho \cdot dS \cdot ds \cdot \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{V^2}{2} \right)$$

Aplicînd legea lui Newton în cazul de față — masa \times accelerația = forțele dependente de masă + forțele dependente de diferența de presiune — se obține:

$$\rho dS \cdot ds \cdot \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{V^2}{2} \right) = -\frac{\partial p}{\partial s} \cdot ds \cdot dS + \rho dS \cdot ds \cdot g \cdot \cos \alpha.$$

Înlocuind pe $\cos \alpha = -\frac{\partial z}{\partial s}$, simplificînd produsul $dS \cdot ds$ și integrînd de-a lungul liniei de curent se obține ecuația lui Bernoulli sub formă tehnică:

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{const} \quad (32)$$

În această ecuație fiecare termen reprezintă o înălțime:

$\frac{V^2}{2g}$, reprezintă înălțimea de viteză;

$\frac{p}{\gamma}$, reprezintă înălțimea de presiune,

și z , reprezintă înălțimea locului.

Din această ecuație se vede că viteza crește numai dacă scade presiunea sau înălțimea locului.

Dacă viteza este neuniform repartizată pe secțiune, se introduce un coeficient de corecție $\alpha \frac{V^2}{2g}$, care se stabilește de la caz la caz.

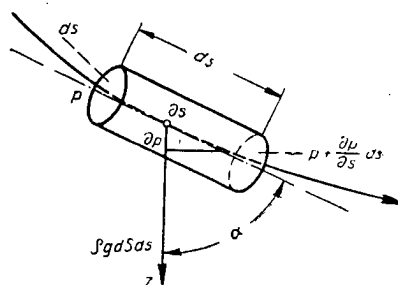


Fig. 20. Forțele care acționează asupra unui volum elementar de fluid.

La mișcări relative, se ține seamă de viteza relativă W și se introduce în ecuație:

$$\frac{W^2 - U^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{const}. \quad (33)$$

La fluidele compresibile se ține seamă de variația greutatei specifice și se integrează înălțimea de presiune

$$\int \frac{dp}{\gamma} = \int v dp \quad \left(\text{după relația } pv = RT \text{ și } v = \frac{1}{\gamma} \right).$$

Ecuația lui Bernoulli devine:

$$\frac{V^2}{2g} + \int \frac{dp}{\gamma} + z = \text{const}.$$

Dacă se împarte relația (32) cu valoarea:

$$\rho = \frac{\gamma}{g}$$

se obține:

$\frac{V^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const.}$ (33), ecuația lui Bernoulli, în forma fizică și în care fiecare termen reprezintă o energie specifică,

$\frac{V^2}{2}$ este energia cinetică a unității de masă;

$\frac{p}{\rho}$ — energia de presiune corespunzător unității de masă;

gz — energia potențială a unității de masă.

b. Ecuațiile hidrodinamice generale ale lui Euler, pentru curgerea fluidelor ideale

Considerând un volum elementar dx, dy, dz de lichid incompresibil ca în fig. 21, de-a lungul

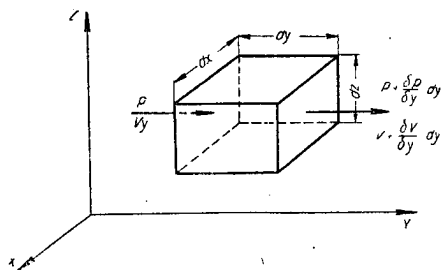


Fig. 21. Variațiile de presiune și de viteză ale unui volum elementar de fluid în deplasare.

uneia dintre axe, lichidul ieșit din volumul elementar își va modifica viteza și presiunea față de viteza și presiunea lichidului intrat.

Aplicând legea lui Newton se scrie: masa înmulțită cu accelerația = forțele legate de masă + forțele datorită diferenței de presiune. În cazul examinat, masa dm este

$$dm = \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz,$$

iar accelerațiile pe direcțiile x, y, z , sint:

$$\frac{dV_x}{dt}; \frac{dV_y}{dt}; \frac{dV_z}{dt}.$$

Componentele forțelor legate de masă pe cele trei direcții sint:

$$\begin{aligned} \rho f_x \cdot dx \cdot dy \cdot dz; \\ \rho f_y \cdot dx \cdot dy \cdot dz \\ \rho f_z \cdot dx \cdot dy \cdot dz \end{aligned}$$

Datorită diferenței de presiune dintre cele două suprafețe ale elementului de volum, pe cele trei direcții va rezulta

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx \cdot dy \cdot dz; \quad -\frac{\partial p}{\partial y} \cdot dx \cdot dy \cdot dz; \\ -\frac{\partial p}{\partial z} \cdot dx \cdot dy \cdot dz, \end{aligned}$$

și aplicând legea lui Newton, spre exemplu pentru axa y , (fig. 21 și ec. 8) se poate scrie:

$$\begin{aligned} \rho \, dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{dV_y}{dt} = \rho f_y \cdot dx \cdot dy \cdot dz - \\ - \frac{\partial p}{\partial y} \cdot dx \cdot dy \cdot dz. \end{aligned}$$

Prin simplificarea produsului $dx \cdot dy \cdot dz$ se ajunge, în același fel, pentru toate cele trei direcții, la ecuațiile diferențiale ale lui Euler.

Astfel se obțin ecuațiile:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= f_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx}; \\ \frac{dV_y}{dt} &= f_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dy}; \\ \frac{dV_z}{dt} &= f_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dz}. \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Dacă forțele exterioare de masă f_x, f_y, f_z provin dintr-un potențial U , acestea se pot exprima astfel:

$$\begin{aligned} f_x &= -\frac{\partial U}{\partial x}; \quad f_y = -\frac{\partial U}{\partial y}; \\ f_z &= -\frac{\partial U}{\partial z}, \end{aligned} \quad (35)$$

iar ecuațiile diferențiale ale lui Euler, se pot scrie vectorial:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \text{grad } U - \frac{1}{\rho} \text{grad } p. \quad (36)$$

De aici se poate ajunge direct la ecuația lui Bernoulli integrând ecuația (36) și presupunând că potențialul $U = gz$

$$\frac{V^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} = \text{const.},$$

sau:

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \frac{V_0^2}{2g} + \frac{p_0}{\gamma} + z_0 = \text{const.}$$

c. Oscilațiile în conducte, sub influența gravitației

Se consideră o mișcare nestaționară unei coloane de fluid, de lungime l , într-o conductă curbată (fig. 22) cu secțiune constantă.

Dacă deplasarea de-a lungul axei conductei, la un moment dat, este x , viteza este peste tot aceeași, $V = \frac{dx}{dt}$ iar accelerația $\frac{d^2x}{dt^2}$.

Extremitatea mai ridicată este la înălțimea $h_1 = x \sin \alpha$, și cea mai coborâtă, la $h_2 = x \sin \beta$, diferența locală de înălțime fiind, deci:

$$h_1 + h_2 = x (\sin \alpha + \sin \beta).$$

Presiunea la extremități fiind p_0 , după ecuația lui Bernoulli, aplicată la cele două capete, se obține astfel:

$$gx(\sin \alpha + \sin \beta) + l \frac{d^2 x}{dt^2} = 0.$$

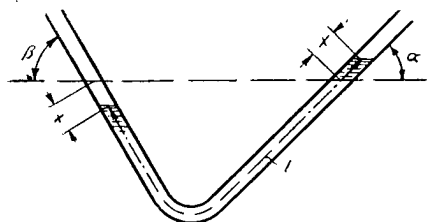


Fig. 22. Oscilațiile unei coloane de fluid într-o conductă.

Soluția acestei ecuații, concordând cu aceea a mișcării oscilatorii:

$$x = A \cos(\omega t + \alpha);$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g(\sin \alpha + \sin \beta)}{l}} \quad (37)$$

dă o perioadă de oscilație:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g(\sin \alpha + \sin \beta)}} \quad (38)$$

La un tub în U, vertical, $\sin \alpha = \sin \beta = 1$ și $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{2g}}$, deci egală cu durata oscilației unui pendul cu lungimea egală cu jumătate din lungimea coloanei de lichid.

d. Curgerea prin orificii

Orificiile sînt practicate în pereții laterali sau în fundul rezervoarelor, al cisternelor, al barajelor etc. La aceste orificii interesează determinarea vitezelor, a debitelor și a coeficienților de curgere prin orificii.

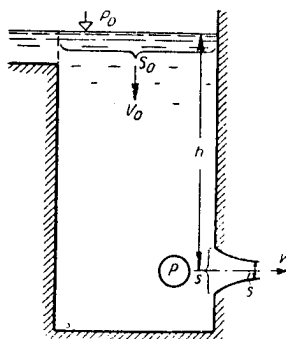


Fig. 23. Rezervor în care are loc o scurgere printr-un orificiu.

1. Orificii cu muchie ascuțită și cu secțiune mică. Aplicînd ecuația lui Bernoulli în cazul vasului din fig. 23, se poate scrie pentru secțiunea S_0 și S ,

$$\frac{V_0^2}{2} + \frac{p_0}{\rho} + gz_0 = \frac{V^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz,$$

considerînd neglijabil pe $\frac{V_0^2}{2}$ față de $\frac{V^2}{2}$, secțiunea sa fiind mult mai mare decît s , și deoarece $p_0 = p$, se poate scrie:

$$V = \sqrt{2g(z_0 - z)} = \sqrt{2gh}, \quad (39)$$

care reprezintă teorema lui Toricelli. (Această viteză a lui Toricelli se corectează cu un coeficient de pierdere prin frecare $V = \beta \sqrt{2gh}$).

La ieșirea lichidului, în pereți subțiri sau groși, cu un orificiu cum este cel din fig. 24, la muchii sînt viteze de curgere foarte mari (mult mai mari decît viteza critică de cavitație) și în acest caz, se formează o gîtuitoră a cărei secțiune $S' = \varphi_c S$ (φ_c fiind coeficientul de contracție).

Deci debitul va fi:

$$q = S'v = \varphi_c S \sqrt{2gh} = \mu_0 S \sqrt{2gh} \quad (40)$$

Pentru muchii ascuțite și cu secțiune mică, dacă se ține seamă și de pierderea prin

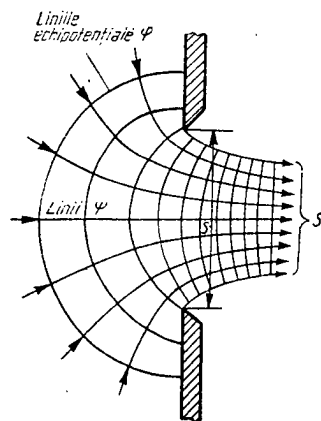


Fig. 24. Curgerea fluidului prin orificiu.

frecare a lichidului, la trecerea prin orificiu, se ajunge la un coeficient:

$$\mu_0 = \varphi_c \beta,$$

în care: μ_0 este coeficientul de debit, la curgere prin orificii;

φ_c — coeficientul de contracție;

β — coeficientul de pierdere prin frecare.

Aspectul curgerii se vede din fig. 24, unde apar liniile echipotențiale φ și liniile de curgere ψ .

Tabela 11. μ pentru muchii ascuțite și cu secțiune mică

h (m)	Secțiunea pătrată				h (m)	Secțiunea circulară			
	$a = 0,02$	0,05	0,10	0,20		$d = 0,03$	0,06	0,18	0,30
0,05	0,658	0,625	0,605	0,585	0,15	0,615	0,600	0,592	0,590
0,10	0,614	0,630	0,611	0,592	0,20	0,611	0,600	0,600	0,600
0,15	0,651	0,631	0,614	0,596	0,40	0,605	0,600	0,600	0,600
0,20	0,648	0,630	0,615	0,598	0,90	0,603	0,599	0,598	0,597
0,50	0,640	0,628	0,617	0,603	1,80	0,600	0,598	0,597	0,596
1,00	0,633	0,625	0,615	0,605	2,40	0,600	0,598	0,596	0,596
2,00	0,612	0,613	0,607	0,601	3,00	0,598	0,597	0,596	0,595
3,00	0,610	0,606	0,603	0,601	6,00	0,596	0,596	0,596	0,594

2. Orificiul mare, cu muchii ascuțite. Dacă orificiul este mare, în raport cu înălțimea, nu se mai poate neglija variația vitezei în lungul

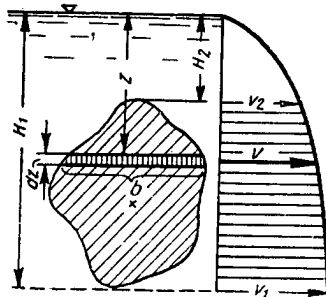


Fig. 25. Distribuția vitezei la curgerea unui lichid printr-un orificiu de formă oarecare.

înălțimii orificiului (fig. 25) și se vede că aceasta este cuprinsă între V_1 și V_2 .

Repartiția vitezei între V_2 și V_1 este:

$$V = \sqrt{2gz + V_0^2} = \sqrt{2gz},$$

și debitul elementar, prin secțiunea bdz , este:

$$dq = \mu_0 b dz \cdot \sqrt{2gz}$$

și

$$q = \mu_0 \sqrt{2g} \int_{H_1}^{H_2} b \sqrt{z} dz, \quad (41)$$

variind deci, după forma geometrică a orificiului.

La secțiunea dreptunghiulară, $b = \text{const.}$, ca în fig. 26, dacă înălțimea orificiului:

$a \ll H$, atunci, cu o eroare foarte mică, se poate aplica formula orificiului mic.

Dacă $a > H$

$$Q = \frac{2}{3} \mu_0 b \sqrt{2g} \left[\left(h_1 + \frac{V_0^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(h_2 + \frac{V_0^2}{2g} \right)^{3/2} \right]. \quad (42)$$

După lucrarea savantului sovietic N.N. Pavlovski « Îndreptar hidraulic » se folosesc următoarele valori ale coeficientului μ_0 pentru obținerea debitului:

la orificii mijlocii, fără pereți directori, $\mu_0 = 0,65$;

la orificii mari, cu contracție imperfectă $\mu_0 = 0,7$;

la orificii de fund, la care contracția are o valoare apreciabilă $\mu_0 = 0,65 - 0,7$;

la orificii de fund cu contracție laterală redusă $\mu_0 = 0,7 - 0,75$;

la orificii de fund, cu intrarea laterală racordată, $\mu_0 = 0,8 - 0,85$.

3. Orificiul circular. La această secțiune b este variabil ca în fig. 27 și egal cu

$$b = 2 \sqrt{r^2 - (H - Z)^2}.$$

Cînd $H = r$, prin integrarea ecuației (41) se obține:

$$Q' = \frac{32 \sqrt{2}}{15 \pi} \mu_0 \pi r^2 \sqrt{2gH}. \quad (43)$$

Cînd orificiul este mic,

$$Q = \mu_0 \pi r^2 \sqrt{2gh} \quad (44)$$

și raportul lor:

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{32}{15} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} = 0,96.$$

Valoarea coeficientului μ_0 variază între 0,62 - 0,64 după natura contracției.

4. Orificiul cu muchie ascuțită, înecat din aval. Dacă nivelul din aval crește peste muchia de jos a orificiului, orificiul se înecă total sau parțial.

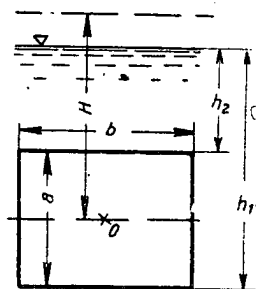


Fig. 26. Orificiu dreptunghiular.

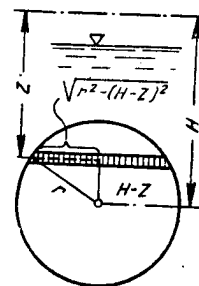


Fig. 27. Orificiu circular.

La orificiul semiîncet,

$$Q = \mu_0 b \sqrt{2gh} \left[\frac{2}{3} (h^{3/2} - h_2^{3/2}) + (h_1 - h) \sqrt{h} \right], \quad (45)$$

în care h_1 , h și h_2 sînt respectiv distanțele de la suprafața liberă la baza orificiului, centrul orificiului și partea superioară a acesteia; iar la orificiul încet,

$$Q = \mu_0 b \sqrt{2gh} (h_1 - h_2) \sqrt{h}, \quad (46)$$

dacă secțiunea este dreptunghiulară, și pentru un orificiu încet cu secțiunea oarecare, S

$$Q = \mu_0 S \sqrt{2gh}.$$

5. Orificii cu ajutaje. În practică, pentru nevoi de evacuare a lichidului se folosesc ajutaje.

Ajutajul este un orificiu cu pereți de ghidaj, care servește la mărirea valorii lui μ_0 cît mai mult.

Tabela 12. Valorile coeficientului μ pentru ajutaje convergente

Unghiul	α°	0	$5^\circ/4$	$11^\circ/4$	$22^\circ/2$	45	$67^\circ/2$	90	Raport
pentru muchia	ascuțită	0,83	0,94	0,92	0,85	0,75	0,68	0,63	$l = 2,6 d$
	rotunjită	0,97	0,95	0,92	0,88	0,75	0,68	0,63	$l = 3d$

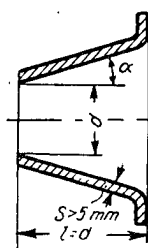


Fig. 30. Ajutaj divergent.

Valoarea optimă a lui μ_0 este 0,946, pentru $\alpha = 6^\circ 15'$. Creșterea lui μ_0 cu unghiul α se explică prin micșorarea pierderilor ca urmare a lărgirii secțiunii.

3) Ajutaj divergent. (fig. 30). Aci odată cu creșterea unghiului α , crește și vidul în secțiunea contractată a ajutajului divergent. Pentru condiții favorabile de lucru trebuie ca la ajutajul divergent unghiul α la vîrf să fie suficient de mic. Pierderile de energie în ajutajul divergent sînt mai mari ca într-un ajutaj cilindric.

Tabela 13. Valoarea coeficientului μ pentru ajutaje divergente

α°	0	$22^\circ/2$	45	$67^\circ/2$	90
μ	0,54	0,55	0,58	0,60	0,63

6. Golirea rezervoarelor prin orificii. Considerînd debitul de golire prin orificii Q și ținînd seamă de debitul Q_1 de alimentare, se disting trei cazuri.

1) Ajutajul tubular: pentru $l = 3-5d$ (fig. 28);

la muchie $\begin{cases} \text{ascuțită,} & \mu_0 = 0,82; \\ \text{teșită slab} & \mu_0 = 0,90; \\ \text{rotunjită bine} & \mu_0 = 0,97. \end{cases}$

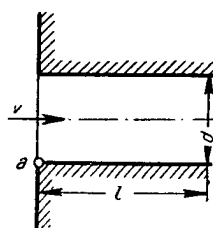


Fig. 28. Ajutaj tubular.

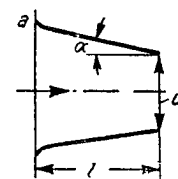


Fig. 29. Ajutaj convergent.

2) Ajutaj convergent. Acest ajutaj se aplică la turbine, pompe de incendiu etc. În tabela 12 valorile lui μ_0 sînt funcție de α și de l/d (fig. 29).

a) Golirea unui rezervor nealimentat, cu orificiul în aer liber. Această problemă se rezolvă luînd în considerație ecuația continuității $Qdt = Sdz$, adică volumul provenit din înmulțirea diferenței de nivel dz cu secțiunea S (v. fig. 31) este egal cu volumul Q , cu care se golește în unitatea de timp rezervorul și este Qdt .

Pentru o formă oarecare a rezervorului se obține, prin integrare, durata timpului T de golire:

$$T = - \frac{S_0}{\mu_0 S' \sqrt{gh}} \int_0^H \frac{f(z)}{\sqrt{z}} dz, \quad (47)$$

în care $S_0 f(z)$ exprimă variația suprafeței cu adîncimea.

Pentru o cisternă cilindrică așezată cu axul vertical, cu secțiune constantă

$f(z) = 1$, deoarece $S_0 = S_1 = S_2 = \text{const.}$

și durata de golire $T = \frac{2S_0 \sqrt{H}}{\mu_s' \sqrt{2g}}. \quad (48)$

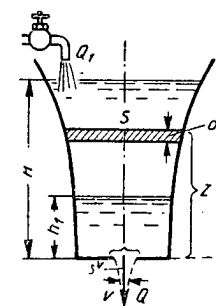


Fig. 31. Rezervor de formă oarecare care se golește printr-un orificiu.

b) Golirea unui rezervor alimentat simultan cu Q_1 . Dacă alimentarea este $Q_1 = \mu_{0s} \sqrt{2gh_1}$, pentru înălțimea h_1 , și golirea rezervorului este $Q = \mu_{0s} \sqrt{2gz}$, se disting trei cazuri:

α) Dacă $Q_1 < Q$, nivelul scade de la nivelul inițial H , la nivelul h_1 . Prin aplicarea ecuației continuității

$$(Q - Q_1)dt = -S_0 f(z)dz = -S_0 f(z) dz,$$

și integrând, se ajunge la timpul de golire:

$$T = -\frac{S_0}{\mu_{0s} \sqrt{2g}} \int_H^{h_1} \frac{f(z) dz}{\sqrt{z - h_1}}. \quad (49)$$

β) $Q_1 > Q$ nivelul va crește de la H inițial, la h_1 și este același T (timp de umplere) ca și la x_1 , dar cu semn schimbat.

γ) $Q_1 = Q$ este cazul când rezervorul nu se golește, păstrându-se un regim staționar.

c) Golirea unui rezervor în mișcare accelerată. Dacă rezervorul urcă cu accelerația a , accelerația de inerție lucrează în același sens cu accelerația gravitației.

Deci, pentru a afla timpul de golire, în formulele de la cazul f_2 și f_2' se va înlocui $\sqrt{2g}$ cu $\sqrt{2(a+g)}$.

Dacă rezervorul coboară, din aceleași considerente, $\sqrt{2g}$ se înlocuiește cu $\sqrt{2(g-a)}$.

Dacă accelerația cu care coboară rezervorul este mai mare decât g , nu se mai produce curgerea lichidului prin orificiu.

e. Fenomenul de cavitație

Fenomenul de cavitație se produce în timpul de curgere al unui fluid datorită unei creșteri foarte mari a vitezei care duce la o scădere a presiunii fluidului sub presiunea de vaporizare.

Din relația lui Bernoulli:

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{p_v}{\gamma} + z = \text{const}, \text{ în care } p_v \text{ este presiunea de vaporizare, se poate scoate viteza critică.}$$

Tabela 14. Presiunea de vaporizare a apei la temperaturi diferite

t°	0	10	20	30	40	60	80	100
p_v (at)	0,0062	0,0152	0,0238	0,0433	0,752	0,2031	0,4826	1,033
p_v/γ (m)	0,062	0,152	0,238	0,433	0,752	2,031	4,828	10,33

f. Întilnirea unui obstacol de către un fluid

Considerind un fluid ce se întâlnește cu un obstacol ca în fig. 32, întrucât în punctul de

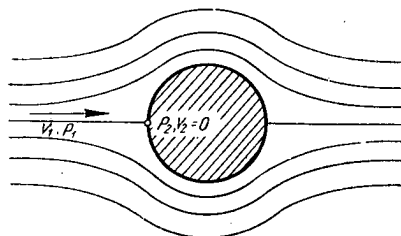


Fig. 32. Curgerea în jurul unui obstacol.

impact $V_2=0$, iar curgerea are loc într-un plan orizontal ($z_1 = z_2$), ecuația lui Bernoulli se va scrie sub forma

$$\frac{p_2}{\rho} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2},$$

de unde rezultă:

$$p_2 = p_1 + \rho \frac{V_1^2}{2}, \quad (50)$$

în care:

p_2 este presiunea totală;

p_1 — presiunea statică, și

$$p_2 - p_1 = \rho \frac{V_1^2}{2} \text{ — presiunea dinamică.}$$

În felul acesta se poate determina viteza cu care curge un fluid, practicînd în acest obstacol un orificiu care corespunde cu instrumentul de măsurat presiunea.

1. Confluența a doi curenți. Dacă doi curenți de fluid de proveniență diferită se întâlnesc în spatele unui obstacol, în general constanta ecuației lui Bernoulli nu mai este aceeași pentru cei doi curenți. Cum între cei doi curenți, în lungul suprafeței de separare, presiunea este aceeași, viteza va fi diferită (fig. 33). Chiar când constanta lui Bernoulli este aceeași de ambele părți, tot mai poate diferi direcția de curgere și deci viteza se poate schimba, în suprafața de discontinuitate, printr-un salt longitudinal, sau transversal, după cum apare una sau alta dintre cauzele de mai sus.

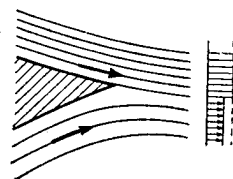


Fig. 33. Întilnirea liniilor de curent după ocolirea unui obstacol.

Adeseori se observă că aceste suprafețe de discontinuitate fiind instabile, ele nu se pot menține mult timp în forma lor primitivă, în unele puncte viteza crescând, în timp ce în altele scade.

Suprafața de discontinuitate se rupe astfel în numeroase vârtejuri mici, al căror proces de formare are o importanță deosebită. Presupunând că înaintarea curentului se produce cu o viteză medie (punctată în fig. 33), și dacă se alege un sistem de referință (fig. 34) al vitezei medii față de timp, fluidul de sus curge la dreapta

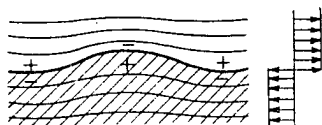


Fig. 34. Suprafețe de discontinuitate.

în timp ce cel de dedesubt rămâne la urmă, în stînga, și apar suprapresiuni și depresiuni, notate cu +, respectiv cu -.

După această distribuție a presiunii, se vede că mișcarea nu poate fi staționară și că, în



Fig. 35. Formarea vârtejurilor pornind de la undulațiile unei suprafețe de discontinuitate.

regiunea de suprapresiune, fluidul se va pune în mișcare spre regiunea de depresiune, ondulația devenind mai puternică (fig. 35). În cele din urmă apare separarea în vârtejuri mici,



Fig. 36. Formarea și descompunerea unei suprafețe de discontinuitate.

care la un loc formează un amestec confuz cu o distribuție neregulată.

Sînt și alte condiții de formare a vârtejurilor prin crearea unei suprafețe de discontinuitate, cum ar fi de exemplu: la un obstacol ascuțit (fig. 36), la început se produce o urmărire a conturului și o îndesire a liniilor de curent. Viteza în jurul vârfului este însă foarte mare (teoretic la fluide fără frecare este infinită). Prin crearea vârtejurii viteza devine mică și explicația vârtejurii constă tocmai în tendința fluidului de a evita vitezele infinite, formînd suprafețe de discontinuitate.

Din fig. 37 se vede evoluția vârtejurii și a suprafeței de discontinuitate.

Experiența arată că astfel de vârtejuri sînt foarte stabile, rezistînd pînă cînd energia aces-

tora se consumă prin frecare. Concluzia este că orice vîrf ascuțit creează în masa unui fluid



Fig. 37. Suprafața de discontinuitate la o placă înclinată sub un unghi.

cu frecare interioară mică, o suprafață de discontinuitate, respectiv vârtejuri.

2. Complement asupra suprafeței de discontinuitate. Într-un fluid cu frecare mică, poate fi considerată ca o regulă fixă formarea unei suprafețe de discontinuitate, ca o urmare a prezenței unui obstacol în lungul unui curent.

Cazul din fig. 38 și 39 prezintă un interes deosebit. La viteze mici se formează liniile de

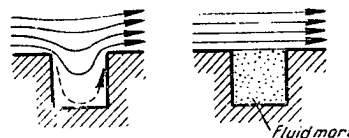


Fig. 38. Fig. 39. Curgerea în apropierea unui intrind.

curent, după fig. 38, vârtejurile și suprafețele de discontinuitate formîndu-se la intrînduri, dar imediat ce se depărtează de intrînd, curgerea rămîne ca în fig. 39. Practic, în intrînd domnește starea de repaus. Presiunea fiind constantă în partea de repaus și trebuind să rămînă astfel de-a lungul suprafeței de separare, prezintă aceeași valoare în intrînd și în curent.

Așadar, legînd intrîndul la un aparat de măsurat presiunea, se poate măsura presiunea statică a fluidului care curge.

3. Măsurarea presiunii fluidelor în mișcare. Cu ajutorul unui tub așezat în fața

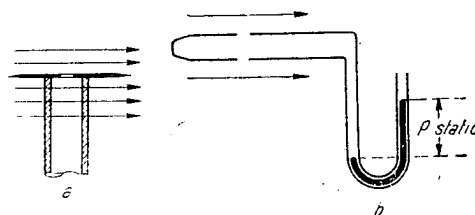


Fig. 40. Manometru pentru măsurat presiunea statică: a — șaiba; b — sondă.

direcției de curgere a unui fluid se poate măsura presiunea totală p_1 .

Pentru a afla p_0 , presiunea statică, se face un orificiu în peretele conductei și prin intermediul unei șaibe (fig. 40, a) se înregistrează presiunea la un manometru. Același lucru

se poate obține pentru rezultatele mai exacte prin intermediul unei sonde (fig. 40, b).

Tubul lui Prandtl, o combinație a saibei și a sondei măsoară presiunea totală și statică dintr-o dată, obținând direct presiunea dinamică.

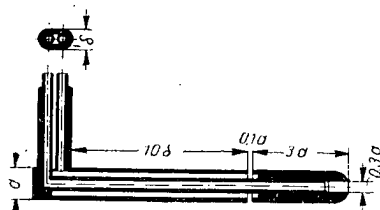


Fig. 41. Tubul Prandtl.

Aparatul arătat în fig. 41 este folosit în mod curent la măsurarea vitezei aerului, în legătură cu un micromanometru.

Cu aparatul Prandtl se execută măsurarea presiunii dinamice P_d .

g. Circulația

Circulația este valoarea integralei de linie pe un contur închis:

$$\Gamma = \oint (V \cdot ds). \quad (51)$$

În câmpul de curgere al unui fluid ideal se consideră pentru linia de curgere AB (fig. 42),

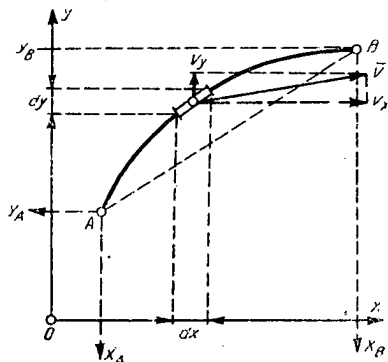


Fig. 42. Viteza unei particule și componentele acesteia.

un element de lungime ds , avînd proiecțiile dx , dy , dz .

Efectuînd produsul scalar dintre viteză și acest element, se găsește:

$$V \cdot ds = V_x dx + V_y dy + V_z dz,$$

și prin integrare de la A la B:

$$\int_A^B (\bar{V} \cdot \bar{ds}) = \int_A^B (V_x dx + V_y dy + V_z dz).$$

Venind înapoi de la B la A, se obține circulația, (fig. 42), pe conturul închis ABA:

$$\Gamma = \oint (\bar{V} \cdot \bar{ds}) = \oint (V_x dx + V_y dy + V_z dz)$$

h. Valabilitatea ecuației lui Bernoulli, perpendicular pe direcția de curgere

Se știe că ecuația lui Bernoulli este valabilă de-a lungul unei linii de curgere, iar perpendicular pe aceasta se fac considerații asupra diferenței de presiune.

Neglijînd pe z , care nu influențează aspectul curgerii, ci numai se adaugă presiunii, pentru distanța dintre două linii de curent în direcția normalei principale n (fig. 43.), unde p este presiunea și r — raza de curbura a traiectoriei, se obține, pentru o curgere curbilinie

$$\frac{V^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial n}$$

Creșterea de presiune pe unitatea de lungime va fi $\frac{V^2}{r}$. Se constată de asemenea că într-o

curgere rectilinie ($r = \infty$) nu există diferență de presiune transversală, perpendiculară pe direcția de curgere.

Diferențiind, în raport cu n , ecuația lui Bernoulli: $\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \text{const}$ se ajunge la:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial n} = -V \frac{\partial V}{\partial n},$$

și din egalitatea cu expresia precedentă se obține:

$$\frac{\partial V}{\partial n} + \frac{V}{r} = 0$$

Considerînd raza de curbura r și asimilînd elementul de normală cu dr , se poate scrie:

$$\frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} = 0 \quad \text{sau} \quad \frac{\partial V}{V} = -\frac{dr}{r}$$

și integrat, $\ln V = \ln k - \ln r$ sau $V = \frac{K}{r}$.

Deci, viteza în interior crește considerabil și din ecuația lui Bernoulli presiunea $p = \text{const} = \rho \frac{K^2}{2r^2}$

Curgerea circulatorie. În această curgere liniile de curgere sînt cercuri concentrice, iar viteza este distribuită hiperbolic, la centru fiind teoretic egală cu infinit.

Circulația $\Gamma = \oint \bar{V} \cdot \bar{ds} = V 2\pi r = \text{constantă}$ și, de aici viteza $V = \frac{\Gamma}{2\pi r}$. Momentul vitezei $\Gamma \cdot r = \text{const.}$

Distribuția presiunii în această mișcare se obține prin egalitatea ecuației lui Bernoulli, pentru două linii de curent (fig. 43):

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

și ținând seamă că $V_1 r_1 = V_2 r_2$, r_1 fiind raza cercului interior și r_2 raza cercului exterior, se găsește că

$$\frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \left[1 - \frac{r_1^2}{r_2^2} \right]. \quad (52)$$

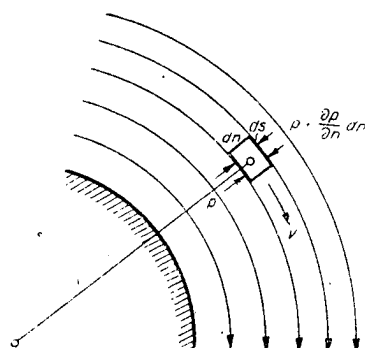


Fig. 43. Liniile de curent ale unei curgeri circulatorii.

Se deduce că presiunile sînt egale, dacă razele sînt egale, iar dacă $r_2 = \infty$, $\frac{p_2}{\gamma}$ tinde spre o valoare constantă (o asimptotă) (fig. 44). $\frac{P_2}{\gamma}$ scăzînd sub o anumită valoare (sub presiunea de vaporizare $\frac{P_v}{\gamma}$), lichidul se transformă în va-

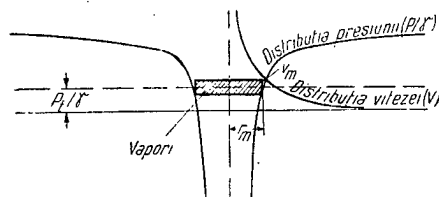


Fig. 44. Repartiția presiunii și a vitezei la o curgere circulatorie.

pori și astfel se poate aprecia raza minimă r_m și viteza V_m pînă la care nu intervine vaporizarea.

i. Rotația

Particule ale unui fluid execută în deplasarea lor o mișcare de translație, o mișcare de deformare și una de rotație. Pentru a se putea defini rotația elementului de fluid se consideră, ca în fig. 45, un volum elementar de fluid, ce se rotește în jurul axei Y . Viteza de rotație este considerată ca fiind egală cu media arit-

metică a rotațiilor laturilor dz și dx din A în A' și din B în B' . Pe acest considerent se poate scrie

$$\omega_y = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}, \quad (53)$$

unde $dV_x = \omega_1 dx$ și $-dV_z = \omega_2 dx$ deci

$$\omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \quad (54)$$

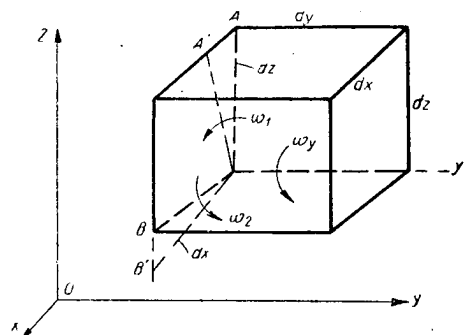


Fig. 45. Un element de fluid supus la o mișcare de rotație.

în același sens se poate obține rotația în jurul axei z și x

$$\omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right)$$

$$\omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z} \right)$$

Vectorial se poate spune că vectorul ω are componentele ω_x , ω_y , și ω_z , încît rotorul vitezei

$$\text{rot } \vec{v} = 2\omega \quad (55)$$

iar rotorul vitezei este reprezentat prin produsul vectorial

$$\text{rot } \vec{v} = [\nabla \vec{v}].$$

j. Teorema circulației constante

Prin teorema circulației constante se înțelege că în cazul fluid omogen și fără frecare interioară, circulația rămîne constantă cu timpul, de-a lungul unei linii fluide închise. Adică

$$\frac{d\Gamma}{dt} = 0 \quad (56)$$

Ținînd seamă de componentele vitezei se poate scrie

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \oint (V_x dx + V_y dy + V_z dz) = 0.$$

Rezolvind ecuația de mai sus pentru direcția x

$$\frac{\partial}{\partial t}(V_x dx) = \frac{dV_x}{dt} \cdot dx + V_x \frac{d}{dt}(dx)$$

și înlocuind pe $\frac{dV_x}{dt}$ din ecuațiile lui Euler se obține

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint (V_x dx) = \oint \left(f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right) dx + \int V_x dV_x$$

Procedind în același fel pe celelalte două direcții și integrând pe o linie închisă, rezultă

$$\begin{aligned} \frac{d\Gamma}{dt} &= U_A - U_B + \frac{1}{\rho} (P_A - P_B) + \\ &+ \left[\frac{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}{2} \right]_A - \left[\frac{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}{2} \right]_B \end{aligned}$$

în care s-a ținut seamă că termenul întâi din dreapta ecuației poate fi considerat ca derivind dintr-un potențial U , că termenul al doilea reprezintă o presiune P și termenul al treilea o viteză V . Se poate scrie deci că pentru o linie închisă

$$\frac{d\Gamma}{dt} = 0.$$

Concluziile acestei teoreme sînt:

— curgerea care începe din repaus este caracterizată printr-o circulație nulă cu timpul pentru fiecare linie de fluid închisă;

— dacă o integrală de linie efectuată pe o linie închisă este egală cu zero, înseamnă că este independentă de drum.

k. Curgere potențială

Curgerea potențială este caracterizată prin faptul că viteza este considerată ca derivata potențialului de viteze Φ la elementul de linie ds :

$$V = - \frac{d\Phi}{ds} \quad (57)$$

Dacă în viteza de rotație

$$\omega_y = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial V_x}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial x} \right]$$

se înlocuiesc vitezele ca fiind derivate dintr-un potențial Φ

$$V_x = - \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad \text{și} \quad V_z = - \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

se obține

$$\omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \cdot \partial x} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \cdot \partial z} \right) = 0. \quad (58)$$

Se vede deci că viteza de rotație este egală cu zero, dacă se admite că viteza derivă dintr-un potențial. Pentru acest motiv o mișcare lipsită de rotație este considerată potențială.

1. Potențialul de viteze Φ satisface ecuația lui Laplace. Înlocuind în ecuația continuității, pentru un fluid incompresibil

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$$

vitezele ca fiind derivate dintr-un potențial

$$V_x = - \frac{\partial \Phi}{\partial x}; \quad V_y = - \frac{\partial \Phi}{\partial y};$$

$$V_z = - \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

se obține

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (59)$$

care reprezintă ecuația lui Laplace, sau vectorial

$$\text{div grad } \Phi = 0 \quad \text{sau} \quad \nabla^2 \Phi = \Delta \Phi = 0 \quad (60)$$

Ecuația lui Laplace este regăsită și în curgerea prin medii poroase, fiind utilizată ca o ecuație de bază. Ecuația lui Laplace fiind liniară, suma sau diferența a două soluții constituie de asemenea o soluție. Aceasta înseamnă că în cazul unei compuneri de două potențiale, vitezele se compun prin însumare vectorială (după regula paralelogramului).

2. Curgerea potențială plană este curgerea în care viteza are aceeași valoare în orice plan paralel cu planul dat, pentru toate punctele ce se găsesc pe normala la punctul dat. Curgerea plană este considerată într-un plan XOY, componenta V_z este egală cu zero, iar celelalte două componente din planul XOY sînt respectiv V_x și V_y . Se poate arăta că partea reală și imaginară a unei funcții de variabilă complexă

$$z = x + iy \quad (61)$$

reprezintă un potențial. Notînd cu Φ partea reală și ψ partea imaginară a unei funcții $F(z)$ se poate scrie

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{dF}{dz} \cdot \frac{\partial z}{\partial x} \quad \text{și} \quad \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{dF}{dz} \cdot \frac{\partial z}{\partial y}$$

dar întrucît

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 1 \quad \text{și} \quad \frac{\partial z}{\partial y} = i$$

egalînd relațiile obținute și ținînd seamă că

$$F(z) = \Phi + i\psi \quad (62)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} + i \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{1}{i} \cdot \left[\frac{\partial \Phi}{\partial y} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \right]$$

rezultă condiția ca partea reală și partea imaginară să fie egale pentru cei doi termeni ai egalității. În acest fel se obțin ecuațiile Cauchy-Riemann:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} = V_x \quad \text{și} \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = - \frac{\partial \Phi}{\partial y} = - V_y \quad (63)$$

Prin diferențiere și adunare a ecuațiilor Cauchy-Riemann se obține

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0$$

ceea ce înseamnă că potențialul Φ satisface ecuația lui Laplace. În același fel se obține și verificarea ecuației lui Laplace pentru funcția de curent ψ . Cele două unghiuri de direcție α_1 și α_2 sînt redată de către tangentele ecuațiilor

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial x}}{\frac{\partial \Phi}{\partial y}} = \frac{V_y}{V_x} \quad \text{și} \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\frac{\partial \psi}{\partial x}}{\frac{\partial \psi}{\partial y}} = -1$$

de unde

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 = -1 \quad (64)$$

cu alte cuvinte liniile de potențial Φ sînt perpendiculare pe liniile de curent ψ .

Liniile de curent $\psi = \text{const}$ și de potențial $\Phi = \text{const}$, în spațiu nu mai sînt linii ca în curgerea plană, ci sînt niște suprafețe.

Caracteristicile liniilor:

La o creștere mică a funcției de curent $d\psi$ corespunde o creștere egală $d\varphi$ a funcției potențiale:

$$d\psi = d\varphi.$$

Între două linii de curent consecutive și două linii echipotențiale consecutive se formează un patruleter curbiliniu.

Liniile de curent se pot considera ca pereții unor canale curbilinii, liniile ψ nefiind străbătute de fluid.

1. Rețelele elementare de curgere potențială plană

1. **Rețeaua curgerii plan-paralele.** Potențialul complex este reprezentat de funcția de z ,

$$f(z) = kz \quad (65)$$

sau se poate scrie întrucît $z = x + iy$ sub forma

$$f(z) = kx + iky.$$

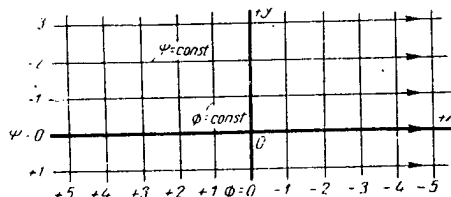


Fig. 46. Rețeaua curgerii plan-paralele.

Deci liniile potențiale sînt $\varphi = kx$ și liniile de curent, $\psi = ky$, reprezentînd o rețea de drepte orizontale și verticale, ca în fig. 46.

Linia de potențial nul $\varphi = 0$ corespunde cu $x = 0$ și $\psi = 0$ la $y = 0$. Pentru alte valori

ale constantei k (de exemplu 1,2,3, etc.) se obțin liniile din fig. 46.

Valoarea vitezelor se obține din ecuațiile Cauchy-Riemann, astfel:

$$V_x = \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} = k = \text{const.}$$

$$V_y = \frac{\partial \psi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = 0.$$

Printr-o înmulțire cu i a ecuației se obține inversarea liniilor de curent cu liniile potențiale.

În coordonate polare

$$f(z) = Kr(\cos \alpha + i \sin \alpha)$$

de unde

$$\varphi = Kr \cos \alpha$$

$$\psi = Kr \sin \alpha$$

2. **Rețeaua unei surse (izvor).** Se consideră că lichidul curge radial dintr-un punct (sursa)

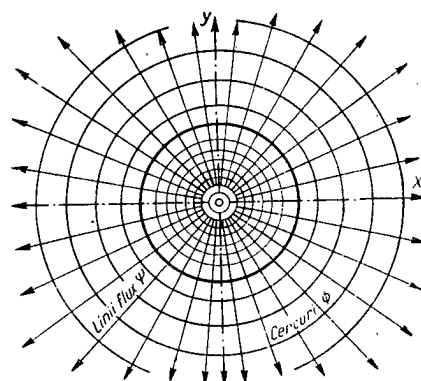


Fig. 47. Sursa.

îndreptîndu-se spre infinit, în toate direcțiile (fig. 47). Volumul izvorit în unitate de timp, adică destul q este redat de expresia,

$$q = 2\pi r v_r,$$

de unde, viteza la distanța r este $v_r = \frac{q}{2\pi r}$

$$= \frac{d\Phi}{dr}.$$

Prin integrare se ajunge la $\Phi = \frac{q}{2\pi} \ln r$.

Funcția care reprezintă această rețea se consideră:

$$f(z) = K \ln z \quad (66)$$

unde funcțiunea $z = x + iy$ permite să se scrie $f(z) = K \ln(x + iy) = K \ln r(\cos \alpha + i \sin \alpha) = K \ln r e^{i\alpha} = K \ln r + K i \alpha = K \ln r + i K \alpha$.

De aici, în coordonate polare, potențialul $\Phi = K \ln r$, liniile de curent $\psi = K\alpha$ și viteza

$$\text{radială } v_r = \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{K}{r} = \frac{q}{2\pi r}.$$

Virtejul potențial. Înmulțind cu i potențialul complex al sursei, se obține o nouă funcție,

$$f(z) = ik \ln z \quad (67)$$

Ecuația (67) reprezintă virtejul potențial, care în coordonate polare devine

$$f(z) = iK \ln z = -K\alpha + iK \ln r = \Phi + i\psi,$$

deci potențialul $\Phi = -K\alpha$ iar $\psi = K \ln r$ reprezintă liniile de curent, care sînt cercuri concentrice cu raze crescînd logaritmice. Circulația Γ este aici $\Gamma = 2\pi rV$ și $V = \frac{\Gamma}{2\pi r}$ și, în

acest caz, potențialul $\Phi = \frac{\Gamma}{2\pi} \cdot (\alpha + n2\pi)$. Prin derivarea lui Φ se ajunge la viteza

$$\frac{\partial \Phi}{n \partial \alpha} = \frac{\Gamma}{2\pi r} = V.$$

Calculînd circulația dintre două linii de curent și dintre două linii de egal potențial, circulația va fi nulă (conturul ABCD). Curgerea este deci o curgere potențială. Dacă însă circulația se calculează în planul unui contur care cuprinde și centrul ea nu mai este egală cu zero (fig. 48).

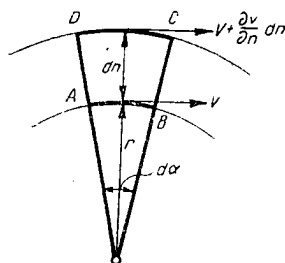


Fig. 48. Virtejul potențial.

3. **Dublețul sau dipolul** rezultă din combinarea a două surse de debit egal și de sens invers, plasate la o distanță infinit mică. Funcția de reprezentare este

$$f(z) = \frac{K}{z} \quad (68)$$

sau

$$f(z) = \frac{K}{x + iy}$$

de unde

$$f(z) = \frac{K(x - iy)}{x^2 + y^2}$$

Liniile echipotențiale $\varphi = -\frac{Kx}{x^2 + y^2}$ sau în coordonate polare $\Phi = \frac{K}{r} \cos \alpha$ și liniile de curent

$$\psi = -\frac{Ky}{x^2 + y^2} = -\frac{K}{r} \sin \alpha.$$

Prin derivarea lui Φ se obțin vitezele:

$$V_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = -\frac{K(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} = -\frac{K}{r^2} (1 - 2 \sin^2 \alpha) = -\frac{K}{r^2} \cdot (\cos 2\alpha)$$

și

$$V_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{-2kxy}{(x^2 + y^2)^2} = -\frac{K}{r^2} \sin 2\alpha$$

iar

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \frac{K}{r^2}.$$

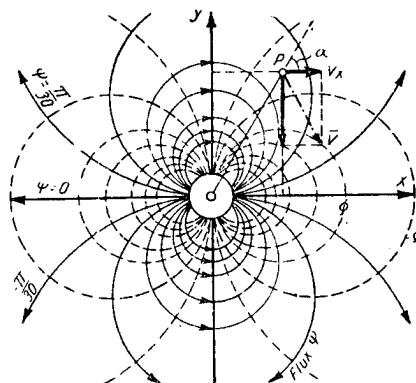


Fig. 49. Doublețul sau dipolul.

În fig. 49 se vede construcția lui \bar{V} , pentru un punct oarecare P, situat la distanța r de sursă.

m. Combinarea de rețele potențiale

Două rețele potențiale adunate dau o nouă rețea potențială.

$$\text{Funcțiile } f_1(z) = \Phi_1 + i\psi_1 \text{ și}$$

$$f_2(z) = \Phi_2 + i\psi_2 \text{ dau}$$

$$f_3(z) = f_1(z) + f_2(z) = \Phi_1 + \Phi_2 + i(\psi_1 + \psi_2)$$

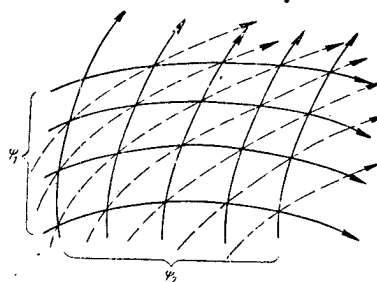


Fig. 50. Combinarea a două rețele plan-paralele.

și partea reală, respectiv cea imaginară a acestei sume satisface ecuația lui Laplace. Grafic, adunarea se face vectorial pentru liniile de curent și pentru liniile de egal potențial (fig. 50).

1. **Combinarea unei surse cu o curgere paralelă.** Curgerea paralelă este funcția $f_1(z) = cz$. Sursa este reprezentată prin funcția $f_2(z) = \frac{q}{2\pi} \ln z$

$$f(z) = cz + K \ln z \quad (69)$$

în care $z = x + iy = r(\cos \alpha + i \sin \alpha)$ și

$$K = \frac{q}{2\pi}$$

Din însumarea lor se obțin:

$$\Phi + i\psi = cr(\cos \alpha + i \sin \alpha) + K \ln r + iK\alpha$$

de unde

$$\text{liniile de curent } \psi = cr \sin \alpha + \frac{q}{2\pi} \alpha = cy + \frac{q}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y}{x};$$

$$\text{liniile echipotențiale } \Phi = cr \cos \alpha + \frac{q}{2\pi} \ln r = cx + \frac{q}{2\pi} \ln (\sqrt{x^2 + y^2})$$

Linia de curent $\psi = 0$, este $y = x \operatorname{tg} \left(2\pi \frac{c}{q} y \right)$, care reprezintă un profil parabolic și împarte, ca în fig. 51, curgerea, în două domenii: a) cîmpul

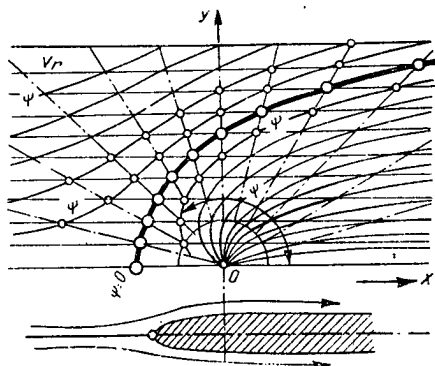


Fig. 51. Combinarea unei surse cu o curgere plan-paralelă.

interior, care arată devierea liniilor de curgere, după profilul parabolic și b) cîmpul exterior, care arată ocolirea profilului parabolic, de liniile de curent.

Viteza complexă este

$$\frac{df(z)}{dz} = c + \frac{q}{2\pi} \left(\frac{x - iy}{x^2 + y^2} \right)$$

care dă componentele după direcția x

$$V_x = c + \frac{q}{2\pi} \cdot \frac{x}{x^2 + y^2} = c + \frac{q}{2\pi r} \cdot \cos \alpha$$

și după direcția y

$$V_y = -\frac{q}{2\pi} \cdot \frac{y}{x^2 + y^2} = -\frac{q}{2\pi r} \cdot \sin \alpha.$$

Linia de separație la $x = \infty$, atinge valoarea

$$y_\infty = \frac{q}{2c} \text{ deci tinde spre o valoare constantă.}$$

2. **Două surse de același sens și de intensitate egală.** Se vor aduna două surse la distanțele $+a$ și $-a$, față de origine în planul oxy

$$f_1(z) = K \ln (z - a)$$

$$f_2(z) = K \ln (z + a) \quad (70)$$

$$f(z) = f_1(z) + f_2(z) = K \ln (z^2 - a^2)$$

$$\text{Liniile de curent } \psi = K \operatorname{arctg} \left(\frac{2xy}{x^2 - y^2 - a^2} \right)$$

Liniile echipotențiale.

$$\Phi = K \ln \sqrt{(x^2 + y^2) + a^2 (a^2 - 2x^2 + 2y^2)}$$

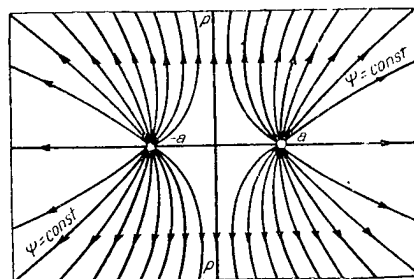


Fig. 52. Combinarea a două surse pozitive și de intensitate egală.

Linia $\psi = 0$ pornește de la cele două surse și formează un perete între cele două surse. Se obține astfel oglindirea sursei față de un plan pp .

Liniile de curent se construiesc relativ ușor (fig. 52), ele fiind o serie de hiperbole, care trec prin punctele a și $-a$. Dreapta pp , perpendiculară pe segmentul $(a) - (-a)$ este de asemenea o linie de curent, încît poate fi considerată drept un perete solid. Liniile de curent care pleacă din (a) sînt la fel influențate de perețele pp , ca și liniile de curent care pleacă din $(-a)$. Influența unui perete asupra unei surse se poate studia cu ajutorul reflectării sursei față de perete. Metoda aceasta este numită metoda ogîndirii sau reflectării.

3. **Combinarea unei surse pozitive cu o sursă negativă de intensitate egală.**

$$f(z) = f_1(z) + f_2(z) = K \ln \frac{z - a}{z + a} \quad (71)$$

Considerînd sistemul de coordonate xoy din fig. 53, în punctul $p(x, y)$, funcția de curent va fi:

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = -\frac{K}{2\pi} (\theta_1 - \theta_2) = -\frac{K}{2\pi} \alpha$$

în care θ_1 este unghiul xa_1P ; θ_2 unghiul xa_2P și α unghiul a_1Pa_2 . Liniile de curent vor forma o familie de cercuri care trec prin punctele A_1 și A_2 .

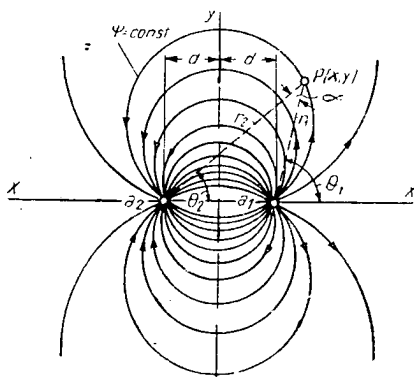


Fig. 53. Combinare a două surse de sens contrar și de intensitate egală.

Considerind $2d$ distanța dintre surse

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{y}{x-d}; \operatorname{tg} \theta_2 = \frac{y}{x+d};$$

$$\operatorname{tg} K = \operatorname{tg} (\theta_1 - \theta_2) = \frac{2yd}{x^2 + y^2 - d^2};$$

$$\psi = -\frac{K}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{2yd}{x^2 + y^2 - d^2},$$

înlocuind $2Kd = m$ se obține:

$$\psi = \frac{m}{4\pi d} \operatorname{arctg} \frac{2yd}{x^2 + y^2 - d^2}.$$

Cînd distanța dintre surse este nulă, funcția de curent pentru $m = \text{const}$, va deveni

$$\psi_{\text{dipol}} = \frac{m}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2} = -\frac{m}{2\pi r} \sin \theta.$$

Liniile de curent ale mișcării vor fi cercuri care trec prin dipol, și sînt tangente la ox (ca la 4-d).

Acest caz este similar celui din problemele de hidraulică subterană în cazul unei sonde de injecție și una de extracție.

4. Suprapunerea unui dipol cu o curgere paralelă. Ecuația dipolului este $f_1(z) = c \frac{a^2}{z}$ și a curgerii paralele, $f_2(z) = cz$. Suma lor

$$F(z) = f_1(z) + f_2(z) = C \left(z + \frac{a^2}{z} \right) \quad (72)$$

$$\text{liniile de curent } \psi = cy \left(1 - \frac{a^2}{x^2 + y^2} \right) =$$

$$= c \left(r - \frac{a^2}{r} \right) \sin \alpha$$

$$\text{și liniile echipotențiale } \Phi = cx \left(1 + \frac{a^2}{x^2 + y^2} \right) =$$

$$= c \left(r + \frac{a^2}{r} \right) \cos \alpha.$$

De aici:

$$V_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = C \left[1 + \frac{a^2(y^2 - x^2)}{(x^2 + y^2)^2} \right]$$

și

$$V_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = -\frac{2ca^2xy}{(x^2 + y^2)^2}$$

La $y = \infty$ este $V_x = C$ și $V_y = 0$, deci la infinit, curgerea este plan paralelă, iar influența dipolului nu schimbă nimic din curgere.

$$\text{La } y = 0, x = \pm a \quad V_x = V_y = 0.$$

$$\text{La } x = 0, y = \pm a \quad V_x = 2C, V_y = 0.$$

Cîmpul exterior reprezintă ocolirea unui cilindru orizontal, ca în fig. 54.

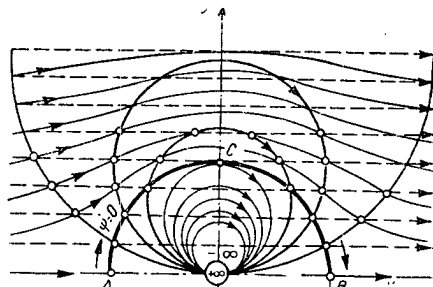


Fig. 54. Combinarea unui dipol cu o curgere paralelă.

Cîmpul interior arată un dipol cuprins în peretele circular.

5. Suprapunerea unui dipol, a unui curent paralel și a unei curgeri circulatorii.

$$\text{Ecuația dipolului: } f_1(z) = c \frac{a^2}{z}$$

$$\text{Ecuația curentului: } f_2(z) = cz$$

$$\text{Ecuația curgerii circulatorii: } f_3(z) = \frac{i\Gamma}{2\pi} \ln z.$$

$$\text{Însumarea lor: } f(z) = C \frac{a^2}{z} + cz + \frac{i\Gamma}{2\pi} \ln z. \quad (73)$$

Din care rezultă:

$$\text{liniile de curent } \psi = cy \left(1 - \frac{a^2}{x^2 + y^2} \right) +$$

$$+ \frac{\Gamma}{2\pi} \ln r = c \left(r - \frac{a^2}{r} \right) \sin \alpha + \frac{\Gamma}{2\pi} \ln r$$

$$\text{și liniile echipotențiale } \Phi = cz \left(1 + \frac{d^2}{x^2 + y^2} \right) + \frac{\Gamma \alpha}{2\pi} = c \left(r + \frac{r^2}{r} \right) \cos \alpha - \frac{\Gamma}{2\pi} \alpha.$$

În A și B se obține viteza complex $\frac{df(z)}{dz}$,

$$\text{care în C dă } V_x = 2c + \frac{\Gamma}{2\pi a}, \text{ iar } V_y = 0.$$

Densitatea liniilor ψ deasupra lui C, dau o viteză mare și, după ecuația lui Bernoulli rezultă o depresiune.

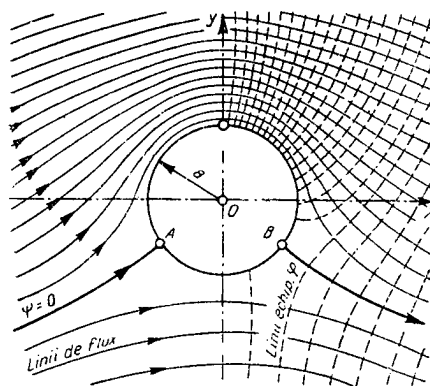


Fig. 55. Combinarea unui dipol cu o curgere plan-paralelă și o curgere circulară.

Între A și B, liniile de curgere rare indică o viteză mică și o presiune mare. Această diferență de presiune de jos în sus poartă numele de «efect Magnus».

6. Aplicațiile practice ale unei curgeri de tipul celei de la 5. Proiectilele sferice au constituit un prim studiu, deoarece după ieșirea lor din tun, ele își deviau lateral traiectoria foarte mult, ca o consecință a rotirii în jurul unei transversale.

S-a încercat să se aplice acest fenomen, la construcții de nave, pentru propulsarea vaselor, folosindu-se cilindri verticali, care se rotesc cu viteză mare (rotorii Flettner).

Acțiunea vântului și rotirea cilindrului produc presiuni transversale, care acționează ca forță motoare (la extremitățile cilindrului se fac discuri cu un anumit profil, pentru a micșora efectul dăunător al acestor extremități (fig. 56).

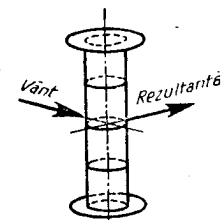


Fig. 56. Aplicarea efectului Magnus.

n. Reprezentări conforme

Se consideră două funcții uniforme și continue

$$\begin{cases} x = x(\xi, \eta) \\ y = y(\xi, \eta) \end{cases} \quad (74)$$

și admițând că este satisfăcută condiția

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial y}{\partial \xi} \neq 0,$$

unui punct π din planul $\xi\omega\eta$ (fig. 57) îi va corespunde un punct (P) în planul xoy (fig. 58). În același fel va exista o corespondență între liniile $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ și liniile l_1, l_2, l_3 din cele două plane. În cadrul reprezentării conforme unghiurile rămân egale însă în ambele planuri.

Admițând între cele două linii ds și $d\sigma$ existența raportului

$$\left(\frac{ds}{d\sigma} \right)^2 = v^2$$

și diferențiind ambele funcții x și y prin raport cu variabilele ξ și η rezultă că pentru ca unghiurile să rămână egale,

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \frac{\partial y}{\partial \eta}, \quad \frac{\partial x}{\partial \eta} = -\frac{\partial y}{\partial \xi} \quad (75)$$

Aceste relații arată că cele două funcții x și y sint funcții armonice reprezentând partea reală și imaginară a unei funcțiuni de variabilă complexă.

Exemple:

$$1. \text{ Funcția } z = \zeta^n \quad (76)$$

în care n este un număr pozitiv, căruia dându-i diverse valori se vor obține diferite reprezentări:

$$- \text{cazul } n = \frac{1}{2}. \text{ Scriind în coordonate polare, } z \text{ și } \zeta$$

se pot exprima

$$z = re^{i\theta}$$

$$\zeta = \rho e^{i\tau} \text{ respectiv } \zeta^n = \rho^n e^{in\tau}$$

$$\text{deci } r = \rho^n \text{ și } \theta = n\tau$$

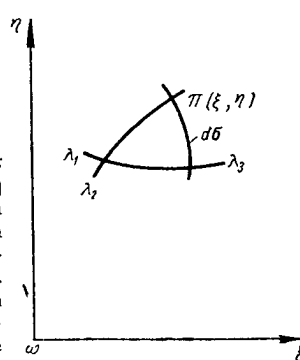


Fig. 57. Planul $\xi\omega\eta$.

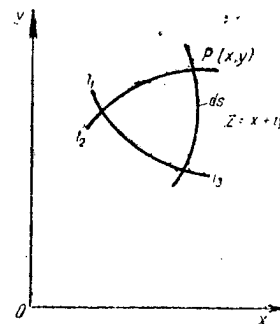


Fig. 58. Planul xoy .

sau înlocuind $n = \frac{1}{2}$ $r = \rho^{\frac{1}{2}}$ și $\theta = \frac{1}{2} \tau$.

Reprezentarea în cele două planuri pentru $n = \frac{1}{2}$ apare în fig. 59 și fig. 60.

2. Funcția $\zeta = z^n$. Dând lui n valoarea 2, rezultă $\zeta = c^2 = c(x + iy)^2 = c(x^2 - y^2) + 2icxy$.

Se vede deci că într-o reprezentare conformă curgerea din plan paralelă (fig. 61) în planul $\xi\eta$, a devenit o mișcare între doi pereți (fig. 62), în planul xoy .

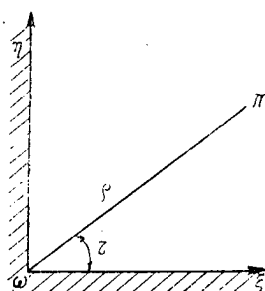


Fig. 59.

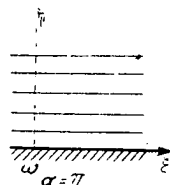


Fig. 61.

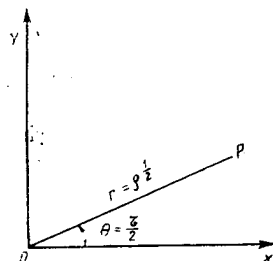


Fig. 60.

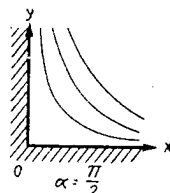


Fig. 62.

3. Transformarea lui Jukovsky. Funcția $z = \zeta + \frac{q^2}{\zeta}$ (77)

Luind un cerc cu centrul în origine în planul $\xi\omega\eta$ (fig. 63) definit prin:

$$\zeta = qe^{i\tau} \quad (78)$$

funcția z devine

$$z = qe^{i\tau} + \frac{q^2}{q} e^{i\tau} = q(\cos \tau + i \sin \tau) +$$

$$i + q(\cos \tau - i \sin \tau) = 2q \cos^* \tau.$$

Dând diverse valori lui τ se obține pentru z

τ	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2
z	$2q$	0	$-2q$	0	$2q$

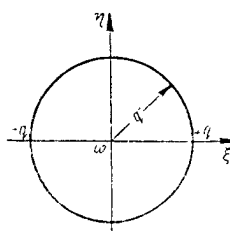


Fig. 63

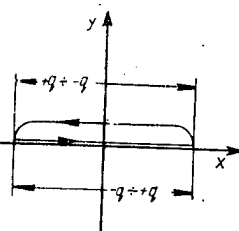


Fig. 64.

în planul xoy cercul devine astfel descris de-a lungul axei x , (fig. 64)

Transformând aceeași ecuație (78) când centrul se găsește tot în origine dar este diferit de q

$$\zeta = ae^{i\theta}$$

de unde

$$z = ae^{i\theta} + \frac{q^2}{a} e^{-i\theta} = \left(a + \frac{q^2}{a}\right) \cos \theta + i \left(a - \frac{q^2}{a}\right) \sin \theta.$$

Se obține astfel o elipsă de forma

$$\frac{x^2}{\left(a + \frac{q^2}{a}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(a - \frac{q^2}{a}\right)^2} = 1 \quad (79)$$

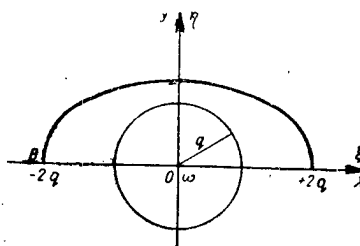


Fig. 65.

— Dacă centrul cercului se află pe axa ox , într-un punct diferit de origine, funcțiunea se transformă într-un arc de cerc

— Dacă cercul centrului e pe axa $o\zeta$, într-un punct diferit de origine se obține un profil de avion (biconvex simetric).

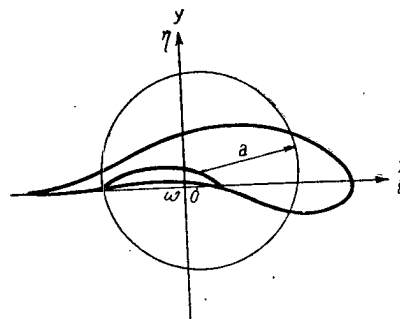


Fig. 66.

— Dacă centrul cercului e undeva în plan — atunci se obține profilul Jukowski ca în fig. 66.

o. Teorema impulsului

Prin impuls sau cantitate de mișcare a unei mase se înțelege produsul dintre masă și viteză. Impulsul fiind o mărime vectorială se poate descompune după axele de coordonate.

$$\vec{I} = m \cdot \vec{V} \quad (80)$$

Diferențiind impulsul prin raport cu timpul, se obține

$$\frac{d\vec{I}}{dt} = \frac{d(m\vec{V})}{dt} = m \frac{d\vec{V}}{dt} + \vec{V} \frac{dm}{dt}.$$

Considerându-se masa constantă atunci $\frac{dm}{dt} = 0$, iar $m \frac{d\bar{V}}{dt}$ conform ecuației din mecanică reprezintă suma forțelor exterioare $\Sigma \bar{R}$ încît,

$$\frac{d\bar{I}}{dt} = \Sigma \bar{R} \quad (81)$$

Pe baza ecuației (81) obținute, teorema impulsului în formă generală poate fi enunțată astfel: derivata față de timp a impulsului este egală cu suma forțelor exterioare. Pentru a studia o mișcare în cazul că aceasta este presupusă staționară și că are loc într-un tub de curent, ca în figura (67), se poate aplica ecuația de mai sus în felul următor:

— masa intrată prin secțiunea f_1 : $\rho f_1 ds_1$
— masa ieșită prin secțiunea f_2 : $\rho f_2 ds_2$

Înlocuind pe $ds_1 = v_1 dt$; și $f_1 v_1 = f_2 v_2 = Q$ se va obține

$$\rho f_1 ds_1 = \rho f_1 v_1 dt = \rho Q dt$$

$$\rho f_2 ds_2 = \rho f_2 v_2 dt = \rho Q dt$$

Masa care intră este aceeași cu masa care iese, dar vitezele sînt diferite și în acest fel impulsul masei care intră în tub este

$$\rho Q dt \cdot \bar{v}_1$$

iar impulsul masei care iese este

$$\rho Q dt \bar{v}_2$$

Impulsurile fiind diferite, (căci vitezele sînt diferite) se poate scrie

$$dI = \rho Q dt \bar{v}_2 - \rho Q dt \bar{v}_1 = \rho Q dt (\bar{v}_2 - \bar{v}_1)$$

sau

$$\frac{dI}{dt} = \rho Q (\bar{v}_2 - \bar{v}_1) = \Sigma \bar{R} \quad (82)$$

Forțele exterioare $\Sigma \bar{R}$ sînt reprezentate prin greutatea proprie plus reacțiunea corpurilor înconjurătoare asupra lichidului și forțele exercitate de restul fluidului asupra masei considerate.

Teorema impulsului are o serie întreagă de aplicații practice. Pentru rezolvarea problemelor se consideră o suprafață de control în care nu se urmăresc vitezele și presiunile în fiecare punct din interiorul acestei suprafețe, ci forțele care acționează la limitele acestei suprafețe.

1. Calculul reacțiunii unui fluid ce se scurge prin orificiul unui vas ca în fig. (68).

După axa OX conform principiului acțiunii și reacțiunii

$$F_x = F'_x$$

Forța F_x va fi egală cu produsul dintre masă, debit și viteză.

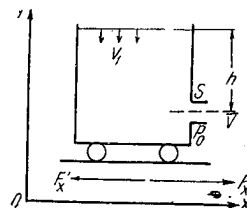


Fig. 68. Impulsul în cazul scurgerii unui fluid printr-un orificiu.

Debitul Q este $SV = S \sqrt{2gh}$ pentru orificiul de secțiune S .

Viteza V este $V = \sqrt{2gh}$ — viteza lui Toricelli.

Deci $F_x = \rho S \sqrt{2gh} \cdot \sqrt{2gh} = \rho \cdot S \cdot 2gh = 2\gamma h S$.

2. Calculul reacțiunilor ce apar în corpurile conductelor ca în fig. (69).



Fig. 69. Impulsul din corpul unei conducte.

Vitezele în cazul conductei de față sînt aceleași, dar au direcții diferite

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 \text{ și } p_1 = p_2$$

de unde

$$\rho Q (\bar{V}_2 - \bar{V}_1) = \Sigma \bar{R} = \bar{F} + \bar{p}_1 S + \bar{p}_2 S$$

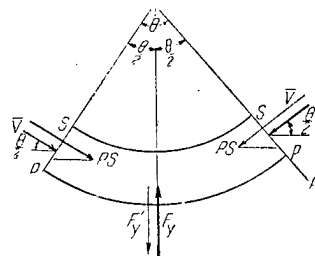


Fig. 70. Impulsul în cazul unui cot de conductă simetric.

3. Calculul reacțiunilor ce apar într-un cot simetric de conductă fig. (70).

Proiecția pe axa ox :

$$\rho Q \left(V \cos \frac{\theta}{2} - V \cos \frac{\theta}{2} \right) = F_x + pS \cos \frac{\theta}{2} - pS \cos \frac{\theta}{2}.$$

Întrucît $F_x = 0$, înseamnă că nu există reacțiune orizontală.

Proiecția pe axa Oy :

$$\rho Q \left(V \sin \frac{\theta}{2} + V \sin \frac{\theta}{2} \right) = F_y - pS \sin \frac{\theta}{2} - pS \sin \frac{\theta}{2}.$$

Forța F_y cu care acționează pereții conductei asupra lichidului este

$$F_y = 2(\rho QV + pS) \sin \frac{\theta}{2}.$$

Forța cu care acționează lichidul asupra pereților conductei:

$$F'_y = -F_y = -2(\rho QV + pS) \sin \frac{\theta}{2}.$$

Calculul de față este utilizat în practica îmbinărilor conductelor.

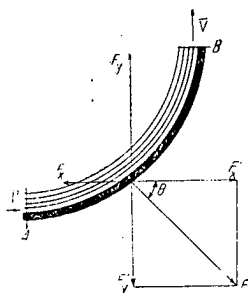


Fig. 71. Impulsul la paleta unei mașini hidraulice.

4. Calculul impulsului la paletele turbinelor hidraulice. În fig. (71) se vede o vină de lichid care se scurge de-a lungul paletei de la A la B. Paleta fiind de dimensiuni mici, se va putea neglija diferența de înălțime pentru A și B.

Aplicînd ecuația lui Bernoulli

$$\frac{V^2}{2} + \frac{p_0}{\rho} = \frac{V_1^2}{2} + \frac{p_0}{\rho}$$

se constată că vitezele sînt egale, întrucît secțiunea este aceeași ceea ce trebuie luat în seamă, este schimbarea de direcție a fluidului și nu variația de viteză.

Presupunînd că presiunea este constantă pe suprafața exterioară, ea își face echilibrul și nu mai apare în calcul.

Reacțiunile F_x și F_y exercitate de paletă asupra fluidului, sînt:

$$F_x = \rho Q \bar{V} (\cos \theta - 1)$$

$$F_y = \rho Q \bar{V} \sin \theta$$

iar componentele F'_x și F'_y a forței exercitate de fluid asupra paletei sînt

$$F'_x = \rho Q \bar{V} (1 - \cos \theta)$$

$$F'_y = -\rho Q \bar{V} \sin \theta$$

În felul acesta se pot determina care sînt eforturile la care trebuie calculată o paletă în funcție de viteza fluidului, în funcție de debit și de unghiul θ .

E. DINAMICA FLUIDELOR REALE INCOMPRESIBILE

a. Caracteristicile curgerii fluidelor reale

În dinamica fluidelor reale, spre deosebire de dinamica fluidelor ideale, pe lângă forțele legate de masă și forțele de presiune, se iau în considerație și forțele de frecare interioară. Toate fluidele posedă o frecare interioară mai mică sau mai mare, încît neglijarea acestor forțe nu corespunde cazurilor din practică. Admiterea frecării interioare presupune existența tensiunilor tangențiale. Pentru a se putea ține seama de aceste tensiuni se consideră două plane, unul fix și altul mobil la distanța y între care se găsește o masă de fluid. Deplasînd planul

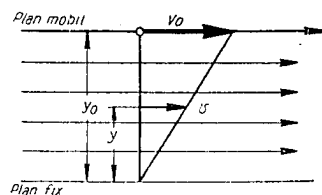


Fig. 72. Repartiția vitezei într-un fluid viscos cuprins între un plan fix și un plan mobil.

mobil cu o viteză V_0 datorită frecării interioare, fluidul se va mișca diferit de la planul fix pînă la planul mobil pe distanța y . Considerînd un punct la distanța y de planul fix, viteza de deplasare corespunzătoare a fluidului va fi V . Ținînd seama că deplasarea fluidului se obține prin exercitarea unei forțe F asupra planului mobil de suprafață S se poate scrie, că tensiunea τ va fi egală cu

$$\tau = \frac{F}{S}.$$

Prin asemănarea triunghiurilor din fig 72 se poate scrie relația

$$\frac{V}{y} = \frac{V_0}{y_0} = \frac{dV}{dy}.$$

Ținînd seama că forța de alunecare pentru planul mobil este proporțională cu viteza și invers proporțională cu distanța de la planul fix, se poate scrie

$$F = \mu S \frac{V_0}{y_0} \text{ sau } \frac{F}{S} = \tau = \mu \frac{V_0}{y_0} = \mu \frac{dV}{dy}.$$

Coefficientul de proporționalitate μ reprezintă de fapt coeficientul de frecare interioară sau

de viscozitate, iar legea fluidelor cu frecare interioară sau legea lui Newton este

$$\tau = \pm \mu \frac{dV}{dy} \quad (83)$$

Coeficientul μ se numește coeficient de viscozitate dinamică și reprezintă forța necesară pentru deplasarea unui strat de o suprafață unitară, cu o viteză egală cu unitatea la o distanță egală cu unitatea de lungime, de la un plan fix.

Unitățile de măsură a viscozității dinamice μ sînt:

în sistemul MKS — $\text{kg} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$

în sistemul CGS — $\text{dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 = 1 \text{ poise}$

Trecerea de la sistemul MKS la sistemul CGS se face prin relații

$$1 \text{ kg s}/\text{m}^2 = 98,1 \text{ dyne s}/\text{cm}^2 \text{ (poise)}$$

$$1 \text{ poise} = \frac{1}{98,1} \text{ (kg s}/\text{m}^2)$$

În practica petrolului unitățile MKS și CGS sînt întrebuițate mai puțin, în locul lor fiind întrebuițat centipoaz-ul (cP)

$$1 \text{ cP} = \frac{1}{100} \text{ dyne s}/\text{cm}^2 \text{ (poise)} = \frac{1}{9810} \text{ kg s}/\text{m}^2$$

În condiții de curgere se întrebuițează foarte adesea noțiunea de viscozitate cinematică (ν) care conține elementele cinematice, lungime și timp, spre deosebire de cea dinamică, care conține și forță. Viscozitatea cinematică este

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

care reprezintă deci raportul dintre viscozitatea dinamică μ și masa specifică ρ a fluidului respectiv. Unitățile de măsură ale viscozității cinematice sînt următoarele:

în sistemul MKS $\text{m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ (stokes) $= 10^6$ (centistokes)

în sistemul CGS cm^2/s (stokes).

Corespunzător centipoaz-ei pentru viscozitatea cinematică se întrebuițează centistokes-ul.

Viscozitatea este măsurată în industria petrolieră în grade Engler $^{\circ}\text{E}$, care reprezintă raportul dintre timpul de scurgere a 200 cm^3 de lichid și timpul de scurgere a unui volum egal de apă la temperatura de 20°C , prin viscosimetrul Engler.

Relația prin care viscozitatea în grade Engler se leagă de viscozitatea în unitățile de măsură MKS este

$$7,6^{\circ}\text{E} - \frac{6,31}{^{\circ}\text{E}} = 10^6 \nu$$

unde ν este exprimată în m^2/s .

Variația viscozității cu temperatura și presiunea este diferită la gaze și la lichide. Viscozitatea în cazul gazelor este independentă de

presiune, însă depinde foarte mult de temperatură. Acest lucru este explicat prin teoria cinetică a ciocnirii moleculelor între ele. Datorită acestor ciocniri viscozitatea crește odată cu creșterea temperaturii. În cazul lichidelor, creșterea temperaturii duce la o micșorare a viscozității, iar variația presiunii este direct proporțională cu variația coeficientului de frecare interioară (cu viscozitatea).

Cazul curgerii strat peste strat (curgere laminară). În fig. 73, se vede un tub de diametru d

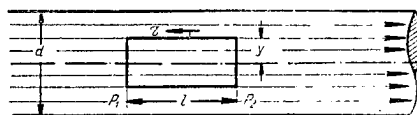


Fig. 73. Curgerea strat peste strat (laminară) a unui lichid într-o conductă.

în care un fluid curgînd cu o viteză foarte mică, fluidul curge strat peste strat.

Considerîndu-se un cilindru elementar de fluid se vede că proiectînd forțele pe axul tubului, se obține în vederea echilibrului egalitatea dintre forțele legate de presiune și forța tangențială.

$$\pi y^2 (p_1 - p_2) = 2\pi y l \tau \quad (84)$$

Înlocuind pe τ din ecuația (83) și scriînd $\Delta p = p_1 - p_2$, ecuația (84) devine

$$dV = - \frac{p_1 - p_2}{2\mu l} y dy$$

sau integrat

$$V = - \frac{p_1 - p_2}{2\mu l} \frac{y^2}{2} + C$$

Constanta C este pentru $y = \frac{d}{2}$, (unde $V = 0$),

de forma $C = \frac{p_1 - p_2}{2\mu l} \frac{d^2}{8}$ de unde rezultă

$$V = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} \left[\frac{d^2}{4} - y^2 \right] \quad (85)$$

valoarea minimă corespunde la $y = \frac{d}{2}$ cînd

$$V = 0$$

valoarea maximă corespunde la $y = 0$ cînd

$$V_{max} = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} \frac{d^2}{4} \quad (86)$$

Ecuația (85) arată distribuția vitezelor după o parabolă. Debitul ce curge prin tub, ținînd seama de faptul că secțiunea conductei e circulară, rezultă prin integrare

$$q = \frac{\pi d^4 (p_1 - p_2)}{128\mu l} \quad (87)$$

Debitul obținut după (ec. 87) împărțit la secțiunea $\pi d^2/4$, dă valoarea vitezei medii V_{med}

$$V_{med} = \frac{q}{\pi d^2/4} = \frac{p_1 - p_2}{32 \mu l} d^2 = \frac{\Delta P}{32 \mu l} d^2 \quad (88)$$

Viteza medie este prin comparația ec. (88) cu ec. (86) de două ori mai mică decât viteza maximă

$$V_{med} = \frac{1}{2} V_{max} \quad (89)$$

Căderea de presiune în cazul curgerii strat peste strat rezultă din ecuația (88)

$$\Delta p = \frac{32 \mu l V_{med}}{d^2} \quad (90)$$

b. Teoria generală a frecării interioare

Această teorie presupune că schimbarea de formă a elementelor de fluid duce la tensiuni asemănătoare celor din corpurile elastice, cu mențiunea că ele nu sînt proporționale cu

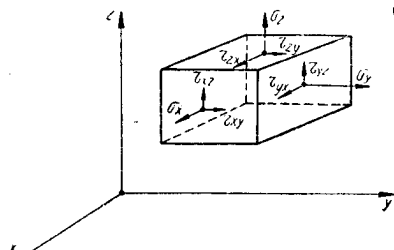


Fig. 74. Tensiunile într-un volum elementar de lichid viscos.

schimbarea de formă (deformarea) și cu viteza deformărilor.

Cele două componente ale tensiunii, ca în fig. 74, trei pe fiecare față, după teoria elasticității sînt:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= 2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \\ \sigma_y &= 2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y} \\ \sigma_z &= 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (91)$$

și

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \tau_x = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = \tau_y = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = \tau_z = \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (92)$$

Dacă aceste tensiuni au aceeași valoare în toate punctele unui domeniu, ele își fac echilibru. Dacă apare o schimbare de formă, tensiunile sînt diferite și, pentru unitatea de volum apar următoarele componente (după teoria elasticității):

$$f'_x = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$$

și analog pentru f'_y și f'_z

$$\begin{aligned} f'_x &= \eta \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] + \\ &+ \eta \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (93)$$

Termenul al doilea din (93) reprezintă tocmai ecuația continuității pentru un fluid incompresibil care se vede din ec. (29), că este egală cu zero. În cazul fluidelor viscoase se adaugă la forțele provenite din diferența de presiune și cele legate de masă, și forțele f' datorită frecării interioare, determinîndu-se astfel ecuațiile de mișcare ale particulelor de fluid.

Ecuațiile diferențiale ale lui Navier-Stokes se formează deci adăugînd, la ecuațiile lui Euler, termenul datorit frecării interioare f' .

Pentru o curgere sub volum constant, ele se scriu:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dv_x}{dt} &= \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta v_x \\ \rho \frac{dv_y}{dt} &= \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \Delta v_y \\ \rho \frac{dv_z}{dt} &= \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \Delta v_z \end{aligned} \right\} \quad (94)$$

în care f_x , f_y , f_z sînt forțele legate de masă, și Δ reprezintă operatorul lui Laplace:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Aceste ecuații ale lui Navier-Stokes sînt foarte greu de integrat, în vederea obținerii unor soluții în diverse cazuri practice.

c. Similitudinea în hidrodinamică

Prin similitudine se urmărește aplicarea rezultatelor numerice, din încercările făcute asupra unui model mic, la un model mare (asemănător cu modelul mic).

Procedeul similitudinii modelelor este folosit acolo unde rezolvarea ecuațiilor Navier-Stokes este dificilă, dar unde totuși trebuie găsită o soluție a problemei.

Similitudinea se bazează pe încercări executate pe modelul mic găsindu-se valoarea numerică, (care nu putea fi găsită pe cale analitică)

și care pe urmă se transformă, după o anumită relație de transpunere, pentru modelul mare.

Dacă toate mărimile care iau parte la fenomenul mecanic sau, mai general, fizic, se transpun asemenea, similitudinea este mecanică sau fizică perfectă, și rezultatele găsite în încercările modelului mic sînt valabile pentru modelul mare.

Adeseori, este convenabil să nu se ajungă la o similitudine perfectă, ci la o similitudine pentru anumite mărimi izolate, și celelalte mărimi să nu fie supuse aceluiași condiții riguroase. În acest caz, similitudinea se numește incompletă.

Există diferite feluri de similitudini: statică, dinamică, termică și termodinamică:

1. Similitudinea statică sau elastică este folosită în problema în care, măsurind deformațiile unui model încărcat static, se trag concluzii pentru valorile numerice necesare construirii corpului mare.

2. Similitudinea dinamică se utilizează cînd se calculează din rezultatele încercărilor unui model, în condiții dinamice, mărimile corespunzătoare ale execuției corpului mare.

3. Similitudinea termică este folosită cînd, din variația de temperatură cu diferiți parametri pentru un model mic, se trag concluzii numerice pentru corpul mare.

4. Similitudinea termodinamică este aceeași ca la punctul c cu urmărirea efectelor dinamice.

Asemănarea geometrică dintre modelul mic (machetă) și corpul mare, nu este suficientă pentru producerea în condiții asemenea a fenomenelor hidraulice, deoarece aici trebuie să se aibă în vedere diferite relații între dimensiuni, viteze, accelerații, forțe, viscozități etc., fiind deci necesară realizarea unei similitudini speciale, dinamice și hidraulice.

Făcînd corespondența între modelul mic (1) și corpul mare (2), care sînt asemenea, urmează că:

λ reprezintă raportul lungimilor $\lambda = \frac{l_1}{l_2}$

(raport care dă și similitudinea geometrică);

τ reprezintă raportul timpilor $\tau = \frac{t_1}{t_2}$;

w reprezintă raportul forțelor $w = \frac{F_1}{F_2}$;

λ , τ și w sînt numere constante și de aici se poate deduce și raportul vitezelor $\frac{V_1}{V_2} = \frac{\lambda}{\tau}$

sau al accelerațiilor $\frac{a_1}{a_2} = \frac{\lambda}{\tau^2}$.

5. Legea modelelor care se aplică în practică este determinată de forțele care intervin în probleme la încercarea modelelor.

Comparația forțelor de inerție dintre modelele (1) și (2) duce la legea generală a similitudinii, a lui Newton.

În comparația forțelor de gravitație se aplică legea lui Froude și la acțiunea forțelor de frecare interioară, legea lui Reynolds.

a) *Legea generală de similitudine a lui Newton.* Forțele de inerție pentru (1) și (2)

sînt: pentru (1): $M_1 \frac{d^2 x_1}{dt_1^2} = K_1$, pentru (2):

$M_2 \frac{d^2 x_2}{dt_2^2} = K_2$ și dacă a_2 și a_1 sînt accelerațiile, raportul forțelor va fi:

$$w = \frac{M_1 a_1}{M_2 a_2}$$

Dacă se notează cu β raportul maselor $\frac{M_1}{M_2}$, după legea lui Newton, se obține: masa înmulțită cu accelerația este egală cu suma forțelor pe direcția considerată, deci:

$$w = \beta \frac{\lambda}{\tau^2}$$

$$\text{cu } \beta = \frac{M_1}{M_2} = \frac{\gamma_1 B_1}{\gamma_2 B_2} = \frac{\rho_1 B_1}{\rho_2 B_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \lambda^3$$

ρ_1 , ρ_2 și γ_1 , γ_2 fiind masele specifice și greutatea specifice ale celor două materiale 1 și 2 iar B_1 și B_2 volumele, rezultă:

$$w = \beta \frac{\lambda}{\tau^2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\lambda^4}{\tau^2}$$

Revenind la mărimile de bază, se obține:

$$w = \frac{k_1}{k_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \lambda^2 \left(\frac{\lambda}{\tau} \right)^2 = \frac{\rho_1 S_1 V_1^2}{\rho_2 S_2 V_2^2}$$

unde S reprezintă arii, iar V , viteza.

Considerînd α un număr fără dimensiune, se obține un cuplu de ecuații:

$$k_1 = \alpha \rho_1 S_1 V_1^2 \text{ și } k_2 = \alpha \rho_2 S_2 V_2^2 \quad (95)$$

Acest cuplu de ecuații reprezintă legea generală de similitudine a lui Newton, care se enunță:

La o similitudine dinamică perfectă, forțele de inerție și celelalte forțe corespunzătoare corpurilor (1) și (2) păstrează între ele, un raport al maselor specifice și al pătratelor vitezelor.

Această lege este aplicată în hidrodinamica fluidelor incompresibile și fără frecare (perfecte), pentru curgerea în jurul avioanelor și al elicelor.

b) *Legea similitudinii pentru fluide grele.* În hidraulică, unele fenomene se produc cu viteze relativ mici față de forțele de masă și de inerție, și, în astfel de cazuri, forțele de frecare interioară (viscozitate) sînt neglijabile.

Pentru corpul mare (1) și modelul (2), datorită gravității, după Newton rezultă că:

$$w = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\lambda^4}{\tau^2}$$

și din egalitatea cu:

$$\alpha = \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{g_1}{g_2} = \frac{\gamma_1 \text{ vol}_1}{\gamma_2 \text{ vol}_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \lambda^3$$

rezultă:

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \lambda^3 = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\lambda^4}{\tau^2} \text{ și cum } \frac{\gamma}{\rho} = g \text{ rezultă}$$

$$\tau = \sqrt{\lambda \frac{g_2}{g_1}}$$

Raportul pentru timpii t_1 și t_2

$$\frac{t_1}{t_2} = \sqrt{\frac{l_1}{g_1}} / \sqrt{\frac{l_2}{g_2}}$$

De aici se vede ce scară a timpilor apare, după ce a fost aleasă scara lungimilor. Dar:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\lambda}{\tau} = \sqrt{\lambda \frac{g_1}{g_2}} = \sqrt{\frac{l_1}{l_2} \frac{g_1}{g_2}}$$

și ridicînd la pătrat raportul vitezelor se obține numărul lui Froude:

$$F = \frac{V_1}{\sqrt{l_1 g_1}} = \frac{V_2}{\sqrt{l_2 g_2}} \quad (96)$$

Dacă încercările se fac în același loc $g_1 = g_2$ urmează că:

$$\frac{V_1^2}{l_1} = \frac{V_2^2}{l_2} \text{ sau } V = \text{const } \sqrt{l} \text{ (verifică legea lui Toricelli).}$$

Timpul $\tau = \sqrt{\lambda}$, într-un caz analizat după Froude, sau:

$$t = \text{const } \sqrt{l}.$$

Raportul accelerațiilor:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{\lambda}{\tau} = \frac{l_1}{l_2} \sqrt{\frac{l_1}{l_2}} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^{3/2},$$

de unde $a = \text{const } l^{3/2}$.

Legea lui Froude este folosită la lichide grele, cu viteze mici și, în general, la mișcări lente.

c) *Legea similitudinii lui Reynolds.* Dacă la o curgere, neglijînd forțele legate de masă, acționează forțele de inerție și de frecare interioară, pentru forțele de inerție se scrie:

$$\alpha = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\lambda^4}{\tau^2}$$

Forțele de frecare sînt proporționale cu viscozitatea μ , cu suprafața straturilor de fluid S și cu gradientul vitezei $\frac{dV}{dn}$, pe normala n , la direcția vitezei și deci:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{dV_1/dn_1}{dV_2/dn_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \lambda^2 \frac{\lambda}{\tau} \cdot \frac{1}{\lambda} = \\ &= \frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot \frac{\lambda^2}{\tau^2}. \end{aligned}$$

Egalînd α rezultă că:

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot \frac{\lambda^2}{\tau^2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\lambda^4}{\tau^2}$$

și pentru timpii corespunzători lui (1) și (2), rezultă:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{l_1^2}{\mu_1/\rho_1} : \frac{l_2^2}{\mu_2/\rho_2} = \frac{l_1^2}{v_1^2} : \frac{l_2^2}{v_2^2}$$

Pentru viteze se găsește:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\mu_1/\rho_1}{\mu_2/\rho_2} = \frac{v_1}{l_1} : \frac{v_2}{l_2}$$

și de aici apare numărul lui Reynolds:

$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu} \quad (97)$$

adică, două fenomene de curgere a două fluide viscoase, 1 și 2, evoluează perfect asemănător din punct de vedere dinamic, dacă numărul Re are aceeași valoare pentru ambele curgeri.

Dacă se experimentează cu același fluid, $v_1 = v_2$, înseamnă că se ajunge la relația simplă: $V_1 = \frac{\text{const}}{l_1}$.

Legea similitudinii lui Reynolds are ca element principal frecarea. La lichide ca apa, în curgeri rapide turbulente, la mașini hidraulice, forțele viscozității sînt mult mai importante decît greutatea lichidului; de asemenea, la aer sau la gaze se vede cu ușurință că greutatea este cu totul fără importanță, față de forțele de inerție și de frecare.

Totodată starea de curgere oarecare a unui fluid cu frecare interioară poate fi caracterizată prin numărul lui Reynolds: $Re = \frac{V \cdot l}{\nu}$.

Un număr mic al lui Reynolds arată preponderența forțelor de viscozitate, și un număr mare al lui Reynolds arată preponderența forțelor de inerție. Din formulă se vede însă, că nu numai viscozitatea determină natura curgerii, ci și dimensiunile (forma geometrică) și viteza au o influență decisivă.

d. Deplasarea unui corp solid într-un fluid viscos

Pentru un fluid cu frecare interioară, orice corp care se mișcă în masa acestui fluid, antrenează cu el un strat limită de grosime δ . Grosimea straturilor, în general, depinde de valoarea frecării interioare.

Această mișcare se studiază greu, în cazurile obișnuite, dar s-a tratat cu succes, pentru o viscozitate foarte mare (numărul lui Reynolds mic) și pentru o viscozitate foarte mică (numărul lui Reynolds mare).

Cazul a) La mișcarea unui corp cu dimensiuni mici într-un fluid foarte viscos glicerina),

au la mișcarea picăturilor de fluid la care inerția este mult prea mică pentru a nu se putea neglija (picături de burniță) față de forțele de frecare interioară (viscozitatea), pentru întregul fluid se poate scrie că forța de frecare își face echilibrul cu diferența de presiune.

Folosind legile similitudinii se scrie că forța de frecare pe unitatea de volum este $\mu \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}$ sau $\frac{\mu V}{l^2}$.

Volumele sînt proporționale cu l^3 , iar forțele de rezistență sînt proporționale cu

$$\frac{\mu V^2}{l^2} \cdot l^3 = \mu V l.$$

Stokes a dat soluția pentru mișcarea sferei:

Rezistența $6\pi \mu vr$ — în care r = raza sferei.

La stropi mici de lichid, dacă ρ_1 = masa specifică a picăturii de lichid și ρ_2 = masa specifică a fluidului înconjurător:

$$6\pi \mu vr = \frac{4\pi}{3} (\rho_1 - \rho_2) g r^3$$

și se obține o viteză de cădere:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\mu} g r^2.$$

Aceasta este valabil pentru o cifră Reynolds, mult mai mică decît l .

Pentru picături de apă în aer, raza fiind dată în centimetri, se obține o valoare $v = 1,3 \times 10^6 r^2$ (rezultă valabilitatea pentru picături cu o rază mică mai decît $1/100$ mm).

Cazul b) Mișcarea fluidelor cu cifre Reynolds mari se obține pentru viteze V mari, pentru lungimi l mari și pentru viscozități cinematice ν mici. Aproximațiile făcute, prin neglijarea lui ν , ar duce la ecuațiile lui Euler, pentru fluidele ideale.

Acțiunea viscozității, cînd cifra Reynolds este foarte mare, se manifestă în apropierea pereților care limitează fluidul, formînd stratul-limită.

Particulele de fluid care au trecut pe lângă pereți și au fost în zona stratului-limită pot ajunge în interiorul fluidului. În interiorul stratului-limită există o stare laminară care duce la desprinderea vîrtejurilor. Cauzele desprinderii acestor strate se datoresc corpului solid și mișcarea turbionară este studiată în teoria vîrtejurilor.

Dacă, însă, pereții au o suprafață netedă, acțiunea forțelor de frecare interioară se manifestă numai în stratul-limită. Aici curgerea poate fi laminară sau turbulentă, în funcție de valoarea numărului lui Reynolds.

În interiorul stratului-limită, presiunea nu variază de-a lungul normalei la perete, ea fiind egală cu presiunea care există pe frontiera exterioară a stratului-limită.

Forțele de viscozitate în interiorul stratului-limită ajung la valoarea forțelor de inerție; urmărind (fig. 75) repartitia vitezei în stratul limită și dacă l este lungimea în direcția de curgere, forța de frecare este de ordinul:

$$\frac{\mu V}{\delta^2}$$

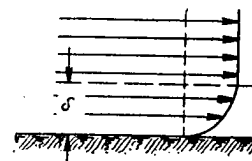


Fig. 75. Strat-limită.

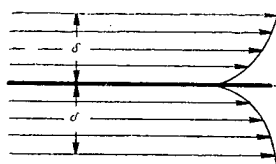
iar ordinul de mărime al forței de inerție pe întregul corp de lungime l este:

$$\frac{\rho V^2}{l}.$$

La limita dintre straturi, prin egalitatea celor două forțe, grosimea stratului-limită δ va rezulta:

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\mu l}{\rho V}} \text{ sau } \frac{\delta}{l} \sim \sqrt{\frac{\nu}{V \cdot l}} = \frac{1}{\sqrt{R}} \quad (98)$$

Pentru o curgere în lungul unei plăci plane (fig. 76) se obține același rezultat, făcînd uz de considerațiile impulsului.



Dacă l este lungimea plăcii, b lățimea ei, V unui fluid în lungul unei plăci plane viteza de curgere, δ grosimea stratului-limită, masa intrată pe secundă este aproximativ $\rho \cdot b \cdot \delta \cdot V$. Considerînd produsul masă δ viteză se obține impulsul $\rho \cdot b \cdot \delta \cdot V^2$.

Frecarea dă o forță $\mu \cdot l b \frac{V}{\delta}$ care trebuie să fie egală cu impulsul.

Din proporționalitatea celor două expresii rezultă:

$$\delta \approx \sqrt{\frac{\mu \cdot l}{\rho V}} = \sqrt{\frac{\nu \cdot l}{V}} = \frac{l}{\sqrt{R}}. \quad (99)$$

Pentru particulele care nu sînt prea aproape de suprafață, timpul t de curgere a fiecărei particule de fluid, în lungul unei plăci plane, este proporțional cu $\frac{l}{V}$, deci $\delta \sim \sqrt{vt}$.

e. Curgerea laminară și turbulentă

În urma studiilor experimentale, curgerile se împart în două categorii: curgeri laminare și curgeri turbulente.

1. Curgerea laminară este o curgere în care liniile de curent sînt paralele între ele, curgerea avînd loc strat peste strat. Domeniul de vala-

bilitate al acestor curgeri este determinat de cifra lui Reynolds. Detaliile acestei curgeri se găsesc la 1-a.

Repartiția vitezelor, a presiunilor și a pierderilor, depinde în special de felul curgerii, care poate fi laminară, critică sau turbulentă, cum și de natura pereților conductei.

2. Zona de trecere de la curgerea laminară la cea turbulentă. Trecerea de la domeniul laminar la domeniul de turbulență nu se face brusc, la un anumit număr al lui Reynolds. Această zonă intermediară depinde, în general, de felul curgerii (viteza unică sau mare), de felul fluidului, de natura stabilității fenomenului care are loc.

Limita superioară la care se trece la turbulență este, în general, 2 320, dar uneori se poate ca această limită să se ridice pînă la 2 600.

În urma unor încercări speciale, unde curgerea se execută în condiții extrem de liniștite, evitându-se orice fel de vibrații, s-a ajuns pentru numărul Re la valori foarte mari, curgerea rămînînd laminară.

S-a ajuns astfel la numere Re critice de ordinul a 12 850, 20 900 sau chiar la 22 000. De asemenea dacă în curgere intervin deranjamente, numărul Reynolds poate scăde și sub 2 000.

3. Turbulența. În curgerea unui fluid viscos de-a lungul unei conducte se constată că, la viteze ridicate, nu mai este valabilă legea mișcării laminare (adică nu mai este o proporționalitate liniară între căderea de presiune și debit).

Într-o curgere experimentală cu un fir de fluid colorat se poate urmări fenomenul și se poate vedea că, la viteze mici, curgerea este laminară, și că depășind o anumită viteză, liniile de curgere se rup, și curgerea devine turbulentă. Mișcarea turbulentă, care este unul dintre cele mai complexe fenomene hidraulice, a fost studiată și explicată de o serie întreagă de savanți sovietici: profesorul Academician M.A. Velikanov, profesorul V. Makareev, autorul teoriei amestecului turbulent, academicienii A. N. Kolmogorov și A. M. Obahov, A. A. Fridman și E. M. Minski.

S-a arătat că, în anumite forme ale mișcării turbulente, energia din mișcarea principală trece în mișcarea de perturbare și că, pe de altă parte, aceste mișcări de perturbare pot fi totdeauna amortizate prin acțiunea unei viscozități suficient de mari (așa se explică de ce curgerea rămîne laminară, chiar la diametre și viteze mari la fluide foarte viscoase).

Pentru aplicarea curgerii turbulente s-a emis teoria că, în cursul unui proces de curgere, trece în medie mai multă energie din mișcarea principală laminară, în mișcarea secundară, decît invers.

Considerînd legea frecării interioare a lui Newton, valabilă în cazul curgerii turbulente, datorită devierilor de la valoarea vitezei medii vor apare impulsuri din care rezultă tensiuni

tangențiale aparente exprimate prin

$$\tau' = -\rho \bar{V}_x' \bar{V}_y'$$

în care v_x' și v_y' reprezintă devierile componentelor viteze V_x și V_y de la valorile medii \bar{V}_x și \bar{V}_y . Presupunînd o curgere în care viteza este variabilă transversal pe linia de curent, masa de fluid s-a deplasat cu o distanță l din poziția y în $y + l$, viteza în y va fi $\bar{V}_x(y)$ și în $y + l$ va corespunde $\bar{V}_x(y + l)$. Deci, în primă aproximație se poate scrie că variația vitezei este $\bar{V}_x(y + l) - \bar{V}_x(y) \approx l \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial y}$, ceea ce reprezintă

tocmai \bar{V}_x' [fig. 77].

La fel V_y are mărimea $V_y' \approx l \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial y}$ iar \bar{V}_x' și \bar{V}_y' avînd totdeauna semne diferite, va rezulta o tensiune tangențială aparentă

$$\tau' = \rho l^2 \left| \frac{d\bar{V}_x}{dy} \right| \frac{d\bar{V}_x}{dy}.$$

Turbulența de-a lungul unui perete lustruit este studiată considerînd tensiunea tangențială totală.

Tensiunea tangențială totală este egală (v. fig. 77) cu suma tensiunii tangențiale apa-

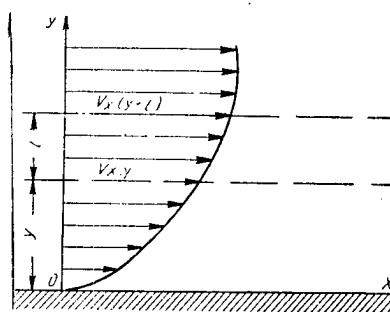


Fig. 77. Repartiția vitezei în apropierea peretelui la o curgere turbulentă.

rente și a forței tangențiale datorită frecării, interioare adică:

$$\tau = \rho \cdot l^2 \left(\frac{dV_x}{dy} \right)^2 + \mu \frac{dV_x}{dy} \quad (100)$$

Deoarece cel de al doilea termen are o valoare neglijabilă (în zona din apropierea peretelui) este neglijat și de aici rezultă:

$$\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = l \frac{dV_x}{dy} \text{ (m/s) iar } \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = V_*.$$

Dacă se consideră doi pereți foarte depărtați și o lungime a conductei foarte mare, atunci

V_x depinde numai de y și rezultă $V_* = \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial y}$.

Lungimea de amestec l , dacă se neglijează efectul viscozității, în apropierea peretelui, va

depinde numai de y și se poate pune astfel

$$l = ky$$

în care k este constanta universală a turbulenței. Deci:

$$V_x = ky \cdot \frac{dV_x}{dy}$$

și dacă se presupune τ constant, V_x va fi tot constant, și, prin integrare:

$$V_x = V_* \left(\frac{1}{k} \ln y + c \right)$$

Formula de mai sus nu este valabilă în imediata apropiere a peretelui, deoarece la $y = 0$, corespunde $V_x = -\infty$.

Constanta c s-a determinat ca fiind egală cu $c_1 - \frac{1}{k} \ln \left(\frac{v}{V_*} \right)$ și, prin introducerea în expresia vitezei:

$$V_x = V_* \left(\frac{1}{k} \ln \frac{yV_*}{v} + c_1 \right)$$

$\frac{y \cdot V_*}{v}$ este o expresie asemănătoare numărului lui Reynolds. Nicuradze a găsit că în tuburi netede $k = 0,40$ și $c_1 = 5,5$.

$$V_x = V_* \left(5,75 \lg \frac{yV_*}{v} + 5,5 \right)$$

În puncte apropiate de perete, unde τ are o valoare constantă, experiențele făcute au găsit:

$$k = 0,417 \text{ și } c_1 = 5,84$$

$$\text{iar } V_x = V_* \left(5,5 \lg \frac{yV_*}{v} + 5,84 \right)$$

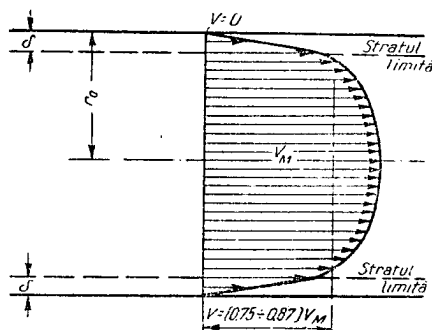


Fig. 78. Repartiția vitezei la o curgere turbulentă.

Pentru numere Reynolds (Re) $< 80\,000$, repartiția vitezelor în curgerea turbulentă se poate reprezenta prin formula:

$$\frac{V_x}{V_*} = 8,7 \left(\frac{yV_*}{v} \right)^{1/7} \quad (101)$$

y fiind distanța de la perete.

În timp ce profilul vitezei în curgerea laminară este o parabolă, la o curgere turbulentă (v. fig. 78) profilul vitezei este o funcție de puterea $1/7$ a lui y .

f. Formarea vârtejurilor și măsuri contra dezlipirii stratului-limită

În anumite condiții de curgere stratul-limită, dă loc la suprafețe de discontinuitate și la vârtejuri, atât în curgerea laminară, cit și în curgerea turbulentă.

Dacă apare o cădere de presiune în direcția curgerii, curgerea este accelerată, particulele de fluid din stratul-limită (care curge mai încet), vor fi supuse și ele la un impuls în direcțiunea mișcării (fig. 79).

Dacă se produce o cădere de presiune în direcția opusă celei a curgerii, particulele stratului-limită vor întârzia mai mult în curgerea lor și, prin consumarea întregii lor energii cinetice, ele se vor întoarce în sensul contrar curgerii, provocând o desprindere a fluidului de pe perete și formarea de vârtejuri. Acest lucru se poate vedea în fig. 79, în cazul curgerii fluidului în jurul unui cilindru.

Aceste fenomene sînt valabile, în general, în orice fel de curgere. Acolo unde secțiunea

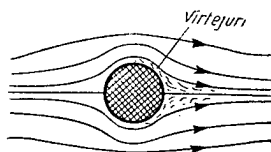


Fig. 79. Curgere în jurul unui cilindru și formarea vârtejurilor.

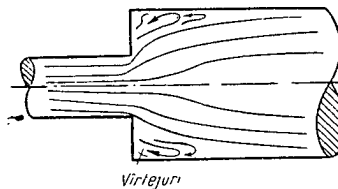


Fig. 80. Vârtejurile la o conductă cu schimbare bruscă de secțiune.

scade, și deci crește viteza (în direcția curgerii), curentul va umple secțiunea în mod uniform, iar acolo unde secțiunea crește, se va produce o curgere mai întârziată, care va duce la o perturbare a curentului.

Pentru cazul unei lărgiri sensibile de secțiune, pe o lungime relativ mică fig. 80 la schimbarea de secțiune se formează un jet asemănător aceluia care se produce la orificii.

Pentru o lărgire mai mică și gradată a secțiunii, jetul de fluid formează vârtejuri sau se sprijină neregulat pe pereții canalului.

Schimbarea bruscă a secțiunii (fig. 80) și a direcției (fig. 81) duce la formarea de vârtejuri, prin desprinderea fluidului de pe perete.

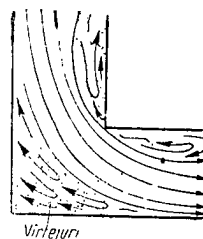


Fig. 81. Curgerea la un cot de conductă și formarea vârtejurilor.

Pentru evitarea acestor dezavantaje, trebuie luate măsuri pentru ca trecerea lentă de la o secțiune mică la una mare, să aibă o formă cât mai treptată și continuă.

Desprinderea stratului-limită se poate evita și artificial, în felul următor:

— Un mijloc de evitare a desprinderii stratului-limită, la variațiile de secțiune ale conductei, constă în aspirarea fluidului prin orificii execu-

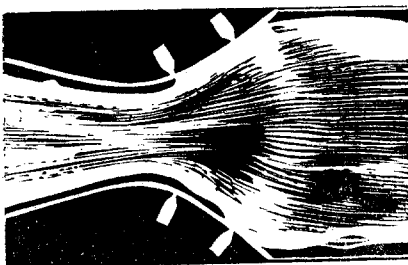


Fig. 82. {Curgerea printr-un canal unde secțiunea se mărește brusc și aspirarea fluidului pentru evitarea vitejurilor.

tate în peretele conductei (fig. 82 și fig. 83) în locul unde se produc desprinderile de fluid.

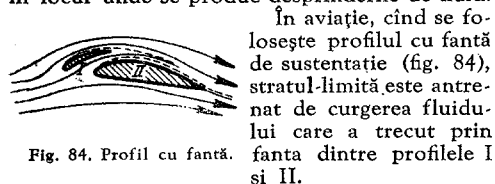


Fig. 84. Profil cu fantă.

Curenți secundari. Dacă un fluid ce curge de-a lungul unei conducte suferă o deviere laterală, căderea de presiune face ca stratele din apropierea peretelui în direcția binormalei, cu viteze mai mici să fie mai deviate decât cele cu viteze mari și care sînt mai departe de peretele conductei.



Fig. 85. Curenți secundari în cotul unei conducte.

Dacă un fluid curge printr-un cot al unei conducte (v. fig. 85), apare o cădere de presiune

radială, de la peretele exterior spre cel interior, iar particulele cu viteze mici, din apropierea peretelui, se mișcă de la exterior spre interior, în timp ce, în regiunea centrală a conductei particulele se mișcă de la interior spre exterior.

Astfel, în dreptul cotului, peste curgerea paralelă cu axul conductei, se suprapun curenți secundari care merg de la mijlocul conductei spre exterior, și de la pereții conductei, spre centru.

g. Curgerea în conducte circulare

Curgerea în conducte circulare depinde de regimul curgerii și de fluidele ce curg.

Stabilindu-se prin cifra Reynolds regimul curgerii, rămîne să fie determinate elementele caracteristice în cele două curgeri laminare și turbulente pentru lichide și gaze.

1. Curgerea laminară a lichidelor. Formulele de bază ale acestei curgeri au fost date pentru viteză și debit.

Distribuția vitezei în curgerea laminară conform ecuației (85), nu se obține odată cu înce-

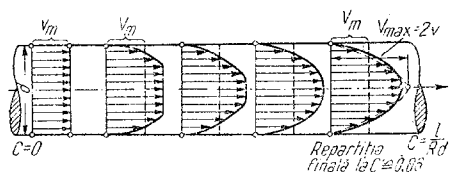


Fig. 86. Lungimea de parcurs inițial la curgerea laminară.

perea curgerii. În fig. 86 se vede că la început viteza V_m este aceeași în întreaga secțiune a conductei și datorită viscozității aspectul parabolic al distribuției vitezei este obținut după parcurgerea unei anumite distanțe (parcurs inițial).

Lungimea acestui parcurs este obținută prin relația

$$l = C \cdot \text{Re} \cdot d \quad (102)$$

în care C a fost găsit experimental aproximativ 0,06.

Coefficientul de frecare C_f la curgerea laminară se determină prin relația

$$\tau_{\max} = \frac{\rho}{2} V^2 C_f \quad (103)$$

și cum τ_{\max} după legea lui Newton ecuația (83) combinată cu ecuația (85) este:

$$\tau_{\max} = \frac{8\mu V}{d} \quad (104)$$

rezultă că

$$\frac{\rho}{2} V^2 C_f = \frac{8\mu V}{d}$$

sau

$$C_f = \frac{16\eta}{\rho V d} = \frac{16}{\text{Re}} \quad (105)$$

Determinarea coeficientului de pierdere de sarcină. Din ecuația (88) se poate extrage valoarea diferenței de presiune

$$\Delta P = 32 \frac{\mu l \cdot V_m}{d^2}$$

Înlocuind în aceasta $\tau_{max} = \frac{8\mu V}{d}$, se obține ținând seamă de ecuațiile (104) și (103) că

$$\Delta P = \frac{4l}{d} \tau_{max} = \frac{4l}{d} \frac{\rho}{2} V^2 \cdot C_f = \frac{4l}{d} \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \frac{16}{Re}$$

de unde

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} V^2 \frac{1}{d} \lambda = \gamma \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{1}{d} \cdot \lambda \quad (106)$$

în care

$$\lambda = \frac{64}{Re} = 4 C_f \quad (107)$$

În fig. 87 se poate vedea că variația lui λ cu cifra Re este liniară, și că între rezultatele

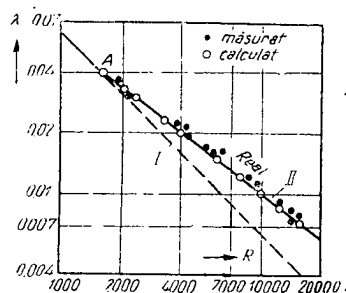


Fig. 87. Variația coeficientului λ la curgere laminară în funcție de numărul Reynolds: I — curba teoretică; II — experimentală.

experimentale (II) și teoretice (I) este o mică diferență.

2. Trecerea de la curgerea laminară la curgerea turbulentă. Curgerea trece din regimul laminar în regim turbulent în jurul unui anumit număr Reynolds. (V. 5. b).

Valoarea acestui număr al lui Reynolds depinde de perturbările din mediul înconjurător, de natura fluidului, de variațiile de direcție și de variația de secțiune.

Corespunzător numărului Reynolds critic, va rezulta din ecuația

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (108)$$

o valoare critică a vitezei, dacă secțiunea și viscozitatea fluidului sunt constante.

În diagrama logaritmică (fig. 88) se vede că la lungimi mari ale parcursului inițial și cifrei Re mici variația lui λ este liniară și conformă cu ecuația teoretică (curba I). La numere Re mari și lungimi mari ale parcursului inițial se obține curba II, așa cum se vede în diagramă.

În cazul curgerii turbulente variația coeficientului λ cu numărul Re este reprezentată

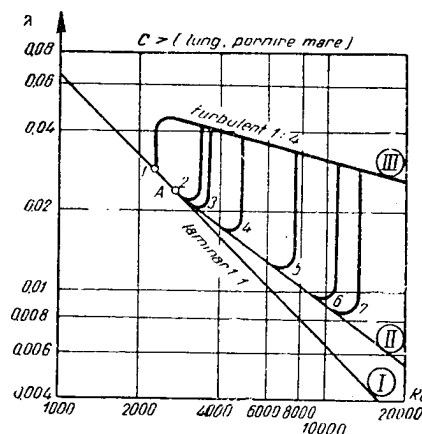


Fig. 88. Variația lui λ la o curgere turbulentă în funcție de cifra Re; în cazul conductelor cu pereți lustruiți.

prin (III). Se vede că în măsura în care curgerea este mai liniștită trecerea de la curgerea laminară curba I, la curgerea turbulentă curba (III) are loc la cifre Re corespunzător mai mari (punctul 1, 2, 3 etc.).

3. Curgerea turbulentă. a) Conducte circulare netede. Se consideră netedă o conductă când rugozitățile conductelor sînt mai mici decît

$$\frac{30 d}{Re^{7/8}}$$

În acest caz, formula pierderii de presiune, ecuația (106) rămîne aceeași, dar ceea ce are importanță este valoarea coeficientului de rezistență λ .

λ este funcție de numărul lui Reynolds și se obține după mai multe formule, pentru numere Reynolds cuprinse în diferite game de valori:

$$\left. \begin{aligned} \text{Pentru } 2320 < Re < 80000 \quad \lambda &= \\ &= 0,3164 \sqrt[4]{1/Re} \\ \text{Pentru } 80000 < Re < 400000 \quad \lambda &= \\ &= 0,0072 + 0,0611/Re^{0,35} \\ \text{Pentru } 400000 < Re < 2 \times 10^6 \quad \lambda &= \\ &= 0,0054 + 0,396/Re^{0,3} \end{aligned} \right\} \quad (109)$$

Pentru valori ale lui $\lambda > 80000$, savantul sovietic P. K. Konakov, a stabilit următoarea formulă teoretică:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2} \quad (110)$$

care a dat rezultate satisfăcătoare, la verificarea ei experimentală.

Cu ajutorul formulei lui Konakov s-au calculat mai multe valori λ pentru diferite valori ale numărului lui Reynolds (tabela 15).

Tabela 15

Re	λ	Re	λ	Re	λ
4 000	0,0403	45 000	0,0212	450 000	0,0133
5 000	376	50 000	207	500 000	130
6 000	356	60 000	198	600 000	126
7 000	340	70 000	192	700 000	123
8 000	328	80 000	186	800 000	121
10 000	308	100 000	178	1 000 000	116
15 000	276	150 000	164	1 500 000	108
20 000	257	200 000	155	2 000 000	103
25 000	243	250 000	148	2 500 000	100
30 000	233	300 000	143	3 000 000	096
35 000	224	350 000	141	3 500 000	095
40 000	217	400 000	136		

În conducte netede și la curgere turbulentă, viteza pentru o distanță y de la axa conductei este dată sub forma:

$$V_x = 1,19 V_m \left[1 - (2y/d)^{1,25} \right]^{1/7}$$

această formulă fiind valabilă și la conducte cu rugozitate mijlocie.

b) În conducte circulare rugoase (cu asperități). Din cauza structurii variate a rugozității, curgerea nu este asemănătoare, mecanic și geometric.

Pentru rugozități mici, rezistența λ este funcție de Re și este aceeași ca și la pereții netezi.

Dacă grosimea neregularităților devine importantă, pentru determinarea coeficientului λ , s-a găsit formula:

$$\lambda = \frac{1}{1,74 + 2 \log(r/k)^2} \quad (111)$$

pentru acest k existind valori determinate (tabela 16). Fig. 90. Nomograma pentru calcularea valorii λ în funcție de rugozitatea relativă. Nikuradze a cercetat experimental și a ajuns astfel la diagrama fig. 89.

Tabela 16. Valorile lui k pentru diferite feluri de conducte

Conducte din	K (m)	Conducte din	K (m)
Oțel tras fără îmbinări	1,0	Tolă nituită îngrijit	4,0
Oțel obișnuit	1,3	Fier vechi ruginit	5
Oțel sudat sau cu asfalt	1,5	Ciment selvisit	2,5
Oțel cositorit	1,8	Ciment neselvisit	7
Oțel neîngrijit luerat	3,0	Lemn nedat la rin	7,0
Oțel ruginit	5,0	dea	
Fontă nouă vopsită	2,2	Zid de cărămidă	10
Fontă nouă nevopsită	3,3	Pietriș fin (1-2 cm)	70
Fontă uzată normal	3,5	Pietriș grosolan (3-5 cm)	300
Fontă turnată neîngrijit	3,6		

În domeniul în care se lucrează curent în tehnică, λ este funcție de k/d , care este rugozitatea relativă:

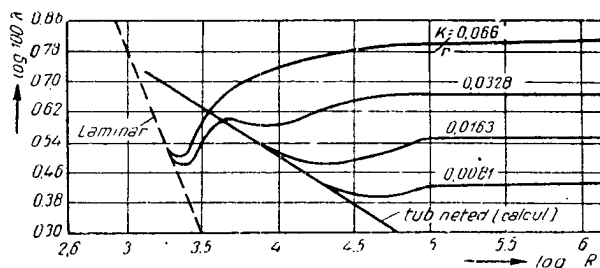
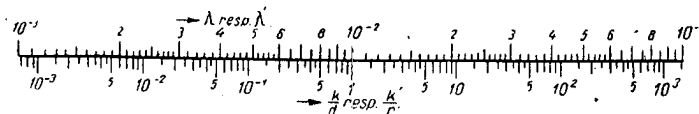
$$\lambda = 10^{-2} \left(\frac{k}{d} \right)^{0,314} \quad (112)$$

care în diagramă (fig. 90) se poate determina direct. La conducte a căror secțiune nu este circulară sau la conducte circulare care nu au întreaga secțiune plină cu lichid, d se înlocuiește

$$\text{prin raza hidraulică } R = \frac{S}{P}$$

La canale circulare, raza hidraulică este jumătate din raza geometrică.

La canale deschise, raza hidraulică este aproximativ jumătate din adâncimea medie a apei (dacă adâncimea apei este mică față de lățimea ei). La scurgerea plană între doi pereți la distanța a , raza hidraulică este $\frac{a}{2}$.

Fig. 89. Variația lui λ cu numărul Re la o curgere turbulentă la conducte cu pereți rugoși.Fig. 90. Nomograma pentru calcularea valorii λ în funcție de rugozitatea relativă.

h. Curgerea în conducte cu alte secțiuni (necirculare)

Din experiențele făcute, pentru diferite forme de conducte se obțin diagramele (fig. 91), ca rezultat al diferitelor valori ale lui λ pentru variații ale lui Re .

1. Curgerea în albie cu rugozitate. Academicianul sovietic N.N. Pavlovski, în urma analizei materialului experimental, dă o formulă care reprezintă formula de bază în calculele hidrotehnice.

Pentru determinarea valorii C , care reprezintă

$$C = \sqrt{\frac{8g}{x}}$$

se folosește relația:

$$C = \frac{1}{K} R^{0,5/5} \quad (113)$$

în care: K este coeficientul de rugozitate al albiei; R — raza hidraulică ($0,1 < R < 3$ m), iar y se determină cu expresia:

$$y = 2,5 K - 0,13 - 0,75 \sqrt{R} (\sqrt{K} - 0,10)$$

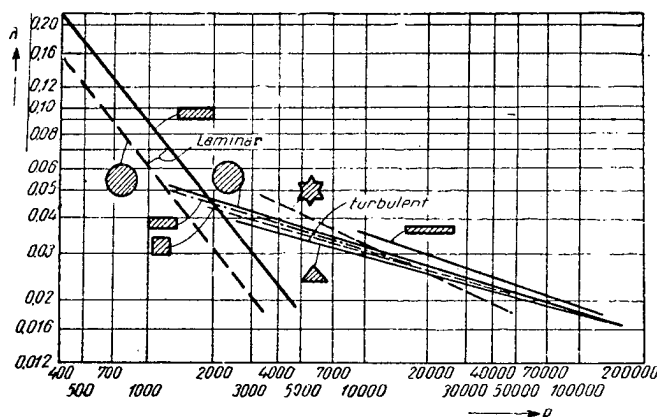


Fig. 91. Variația lui λ cu numărul Re pentru diverse secțiuni de conducte.

sau, după Pavlovski, y poate fi înlocuit cu valorile:

$$y \approx 1,5 \sqrt{K} \quad \text{pentru } R < 1 \text{ m.}$$

$$y \approx 1,3 \sqrt{K} \quad \text{pentru } R > 1 \text{ m.}$$

Tabela 17. Valorile lui n pentru diferiți pereți

Natura peretelui	K
Suprafață foarte netedă emailată sau lăcuită ..	0,009
Scinduri geluite	0,011
Tencuială de ciment curat.....	0,012
Scinduri negeluite	0,012
Conducte foarte curate	0,012
Conducte murdare (canalizare)	0,014
Canale betonate obișnuite	0,018
Canale cu un strat stabil de loess	0,0225
Canale de pământ bine întreținute	0,025
Zidărie uscată	0,035
Canale în condiții foarte bune	0,040
Canale în condiții foarte proaste de întreținere..	
Canale excepțional de prost întreținute	

2. La riuri și canale intervine și panta de nivel $i = \frac{z_1 - z_2}{l}$ pentru lichidele cu masa specifică ρ , și în acest caz:

$$p_1 - p_2 = \rho g (z_1 - z_2)$$

iar

$$i = \frac{1}{\zeta_g} \cdot \frac{p_1 - p_2}{l} = \frac{\lambda'}{R} \cdot \frac{V_m^2}{2g}$$

de unde:

$$V_m = \sqrt{\frac{2g}{\lambda'} Ri} = K \sqrt{R \cdot i} \quad (\text{formula lui Chézy}).$$

i. Curgerea prin conducte drepte și cu secțiune variabilă

1. La o micșorare de secțiune, cu o rotunjire lentă, fără ca să urmeze mărimi de secțiune, nu apar alte rezistențe decât frecarea pe pereți.

Coeficientul de rezistență, raportat la secțiunea cea mai strîmtă, $\eta = 0,05 - 0,06$. Pierdere este cu atît mai mică, cu cît Re este mai mare și suprafața conductei mai netedă.

La o rotunjire neînsemnată ca în fig. 93, lichidul se desprinde și lucrează ca o vină liberă, contractîndu-se și avînd ca urmare o pierdere de energie. Pentru refacerea curgerii la dimensiunile secțiunii S_2 este necesară o lungime de circa $(8-10)d_2$.

φ_c reprezintă coeficientul de

contractie (raportul dintre secțiunea minimă a vinei de fluid S' și secțiunea deschiderii orificiului S_0) valoarea sa depinzînd de felul muchiilor.

$$\varphi_c = \frac{S'}{S_0} \quad (114)$$

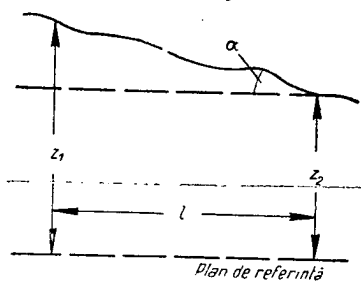


Fig. 92.

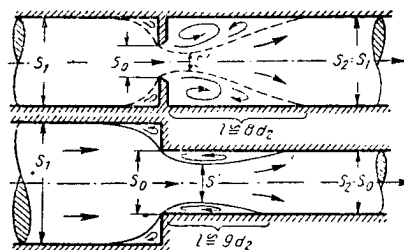


Fig. 93. Variație bruscă de secțiune la curgerea prin conducte.

Dacă $S_0 \leq 0,1 S_1$, în fig. 95 va fi:

$\varphi_c = 0,62 - 0,64$, la muchii colțuroase;

$\varphi_c = 0,7 - 0,8$, la muchii slab protejate;

$\varphi_c = 0,9$ la muchii rotunjite puțin;

$\varphi_c = 0,99$ la o rotunjire perfectă.

Dacă însă $S_0 \geq 0,1 S_1$, φ_c ia valori mari, iar în tabela 18 sînt date valorile obținute din experiențe.

Tabela 18

$S_2 : S_1$	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
φ_c	0,80	0,61	0,62	0,65	0,70	0,77	1,0

2. Mărirea bruscă de secțiune. În cazul unui fluid ce curge cu o viteză V într-o conductă de secțiune S_2 , la o schimbare bruscă de secțiune apar pierderi de presiune. Vîna de fluid dă naștere la început (imediat după ce a intrat în secțiunea mărită) la o serie de vârtejuri (fig. 93). Creșterea de presiune se calculează pe baza teoremei impulsului, fără a ține seamă de ce se întîmplă în interiorul suprafeței de control:

$$p_2 - p' = \rho (V' - V_2) V_2$$

Ținînd seamă că dacă această creștere de secțiune ar fi avut loc în mod lent, atunci din

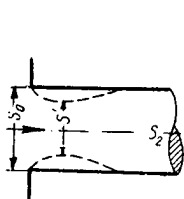


Fig. 94. Ajutaj cu muchii ascuțite.

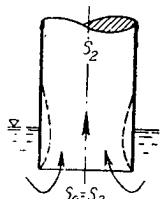


Fig. 95. Ajutaj scufundat în lichid.

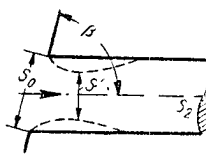


Fig. 96. Ajutaj oblic.

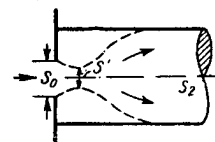


Fig. 97. Ajutaj cu diafragmă.

relația lui Bernoulli căderea de presiune ar fi rezultat sub forma:

$$p_2 - p' = \frac{\rho}{2} (V'^2 - V_2^2),$$

se deduce valoarea suplimentului de pierdere de presiune, așa-zisă — întrucît redă o pierdere de energie cinetică — pierdere de șoc, deși fenomenul în sine nu reprezintă aceasta.

Raportul celor două pierderi de presiuni este:

$$\eta = \frac{p_2 - p'}{p_2 - p'} = \frac{2}{1 + \frac{S_2}{S'}} \quad (115)$$

Iar coeficientul de pierdere este:

$$\begin{aligned} \text{pentru } V' \text{ corespunde } \xi' &= \left(1 - \frac{S'}{S_2}\right)^2 \\ \text{pentru } V_2 \text{ corespunde } \xi_2 &= \left(1 - \frac{S_2}{S'}\right)^2 \end{aligned} \quad (116)$$

valorile pierderilor sînt date în tabela (19).

Coeficientul de rezistență ξ în cazul ajutărilor sînt redată pentru diverse forme de ajutăre ca în fig. 94—97.

Coeficientul de rezistență ξ_2 , față de secțiunea S_2 , pentru ajutorul fig. 94 este

$$h_2 = 0,5, \text{ la muchii ascuțiți.}$$

La ajutăre, ca în fig. 95 scufundate în lichid se obține:

$$\eta_2 = 3,0, \text{ la muchii ascuțiți;}$$

$$\eta_2 = 0,65, \text{ la țesirea ambelor fețe de intrare.}$$

$$\text{La ajutăre oblice, ca în fig. 96}$$

$$\eta_2 = 0,5 + 0,3 \cos \beta + 0,2 \cos^2 \beta.$$

La ajutăre acoperite de o diafragmă (fig. 97), se obțin rezultate diferite, în funcție de raportul S'/S_0 , ca în cazul variațiilor de secțiune.

3. Curgerea prin conducte drepte cu secțiune variabilă continuu. Pentru a obține o cifră Re critică mai mare, la care curgerea să devie turbulentă, se caută să se facă o trecere continuă de la secțiunea mică la cea mare.

Este deci interesant de găsit limita divergenței la care nu se produc desprinderi ale lichidului de pe pereți (adică evitarea vârtejurilor).

Încercările au găsit că pînă la $Re \leq 100\,000$, unghiul limită al tubului evazat conic este $\alpha \cong 8^\circ$ sau mai exact, $\alpha \cong 150 R^{-1/4}$.

Pentru trecerea din secțiunea F_1 (fig. 98), în secțiunea F_2 , printr-un ajutor, se consideră

Tabela 19

S'/S_2	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
η	0	0,182	0,333	0,461	0,572	0,667	0,75	0,824	0,888	0,947	1
ξ'	1	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16	0,09	0,04	0,01	0
ξ_2	∞	81	16	5,44	2,25	1,00	0,444	0,184	0,067	0,0123	0

$\delta = 8^\circ$ unghi favorabil de mărire, de unde rezultă pierderea de presiune:

$$p_2 - p_1 = (0,80 - 0,85) (V_1^2 - V_2^2) \rho / 2,$$

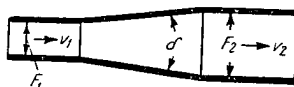


Fig. 98. Variația continuă de secțiune.

și coeficientul de rezistență, raportat la V_1 este:

$$h_1 = (0,15 - 0,20) [1 - (F_1/F_2)^2].$$

j. Curgere prin conducte cu variație de direcție

1. Curgerea prin conducte curbe. Datorită diferenței de viteză a particulelor fluidului în dreptul cotului, particulele cu viteză mare tind în drumul lor spre pereți, iar particulele

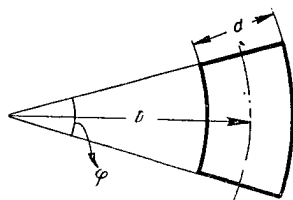


Fig. 99. Conductă curbă.

întârziate în apropierea pereților în direcția binormalei vor fi împinse spre centrul de curbura a conductei. Se creează astfel curenți secundari, care împreună cu frecarea dau naștere la pierderi de presiune.

La o mișcare turbulentă se produce o pierdere de presiune în lungul conductei

$$\Delta p_1 = \xi_1 \frac{V^2 \gamma}{2g}$$

în care

$$\xi_1 = \lambda \frac{1}{d}$$

și o pierdere locală de presiune în curbura conductei

$$\Delta p_2 = h_2 \frac{V^2 \gamma}{2g}$$

de unde, pierderea totală:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2.$$

S-a găsit experimental că pentru raportul $\frac{D}{d} \cong 8$ (fig. 98) valoarea lui ξ_2 este minimă și cu cât crește numărul lui Reynolds, valoarea lui ξ_2 scade.

— pentru secțiune dreptunghiulară

$$\xi = \left[0,12 + 0,27 \left(\frac{2d}{D} \right)^{7/2} \right] \frac{\varphi^\circ}{90^\circ}$$

— pentru secțiune circulară

$$\xi = \left[0,13 + 0,16 \left(\frac{2d}{D} \right)^{7/2} \right] \frac{\varphi^\circ}{90^\circ}.$$

Pentru ξ_2 , la țevi cu rugozitate medie și cu numărul lui Reynolds $\cong 50\,000$, s-au obținut valorile redade în tabela 20.

Tabela 20

φ	45°	63°	90°	120°	135°	180°
$D/d = 8$	$h_2 = 0,075$	0,094	0,120	0,139	0,146	1,169
10	—0,069	0,086	0,110	0,128	0,134	0,154
12	0,063	0,080	0,102	0,118	0,124	0,143
15	0,058	0,073	0,093	0,108	0,113	0,131
20	0,050	0,062	0,080	0,093	0,097	0,112
25	0,043	0,054	0,069	0,080	0,084	0,097
30	0,037	0,047	0,060	0,070	0,073	0,084
40	0,029	0,036	0,046	0,054	0,056	0,065
50	0,021	0,026	0,033	0,038	0,040	0,046

Pentru alte numere Reynolds, ξ_2 se înmulțește cu valoarea corespunzătoare K din tabela 21.

Tabela 21

Re	3 000	10 000	100 000	250 000	500 000
K	2,18	1,47	0,88	0,76	0,69

Pentru conducte cu secțiunea circulară, cu corecția φ și pentru $Re = 225\,000$, după Vasiievski, sint:

Tabela 22

r/d	1	2	4	6	10
neted	$\varphi = 15^\circ \dots$	$h = 0,03$	0,03	0,03	0,03
	$\varphi = 22,5^\circ \dots$	0,045	0,045	0,045	0,045
	$\varphi = 45^\circ \dots$	0,14	0,09	0,08	0,075
	$\varphi = 60^\circ \dots$	0,19	0,12	0,10	0,09
	$\varphi = 90^\circ \dots$	0,21	1,14	0,11	0,09
rugos	$\varphi = 90^\circ \dots$	0,51	0,30	0,23	0,18
				0,20	

La curgeri laminare pierderea de presiune se obține

$$\Delta p = 11,84 \frac{V \nu l}{g d^2} \left(Re \sqrt{\frac{d}{D}} \right)^{0,36}$$

2. Curgerea prin coturi frînte. Pierderea de presiune în coturi frînte (fig. 100) este mult mai mare decît în conductele drepte sau decît în cele curbe, aici pierderile de fluid și zonele de turbulență fiind mai mari.

$$\xi_1 = \frac{1}{d} = 0 \text{ deci } \xi = \xi_2.$$

În acest caz $\xi_1 = l/d = 0$ deci $\xi = \xi_2$. Din experiențe s-a găsit $\xi = 0,946 \sin^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) + 2,047 \sin^4 \left(\frac{\varphi}{2} \right)$, pentru $90^\circ < \varphi < 180^\circ$.

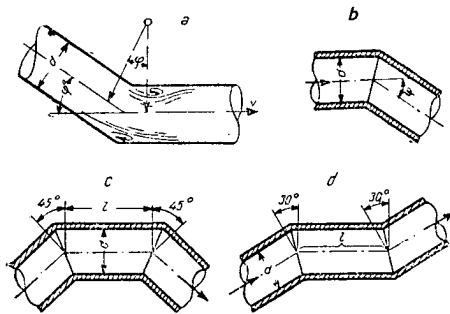


Fig. 100 a, b, c, și d. Conductă frîntă.

Pierderile în conducte de 2" la viteze mai mari decît 2 m/s și la un unghi de abatere φ , au (fig. 100) următoarele valori:

La coturi simple

Tabela 23

φ°	22,5	30	45	60	90
neted ξ	0,07	0,11	0,24	0,47	1,13
rugos ξ	0,11	0,17	0,32	0,68	1,27

La coturi drepte

Tabela 24

l/d	0,71	0,943	1,174	1,42	1,86	2,56	6,28	∞
neted ξ	0,51	0,35	0,33	0,28	0,29	0,36	0,40	0,47
rugos ξ	0,51	0,41	0,38	0,38	0,39	0,43	0,45	0,44

La coturi frînte

Tabela 25

l/d	1,23	1,07	2,37	3,77
neted ξ	0,16	0,16	0,14	0,16
rugos ξ	0,30	0,38	0,26	0,24

Tabela 26

m	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7
Ajutaj normal	0,905	0,82	0,67	0,54	0,43	0,33	—
Diafragmă normală	0,95	0,9	0,79	0,69	0,6	0,5	0,33

3. Curgere prin conducte în T. După cum se desparte fluidul, sînt anumite pierderi și,

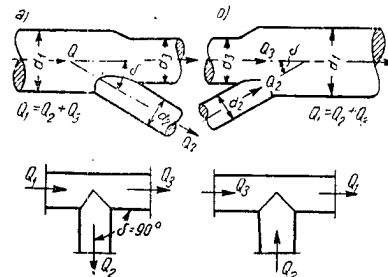


Fig. 101. Conducte în T.

din încercările făcute, a rezultat că $\Delta p = h_2 \frac{\gamma V^2}{2g}$, în care ξ_2 nu depinde de numărul lui Reynolds, ci de raportul d_2/d_1 .

k. Calculul conductelor

Metodele de lucru pentru dimensionarea unei conducte derivă din elementele date și cerute în cadrul unei teme. Se pot da și se pot cere următoarele:

Cazul I: se dă debitul q , diametrul d al conductei, diferența de presiune ΔP și se cere lungimea conductei L .

Cazul II: se dă debitul q , diametrul d al conductei, lungimea L și se cere căderea de presiune ΔP pentru a se putea dimensiona compresorul în cazul transportului gazelor, sau pompa în cazul transportului lichidelor pe conductă.

Cazul III: se dă debitul q , lungimea conductei L , pierderea de presiune ΔP și se cere dimensionarea conductei, respectiv diametrul d .

Cazul IV: se dă diametrul conductei, lungimea L a acesteia și căderea de presiune ΔP , cerîndu-se determinarea debitului q .

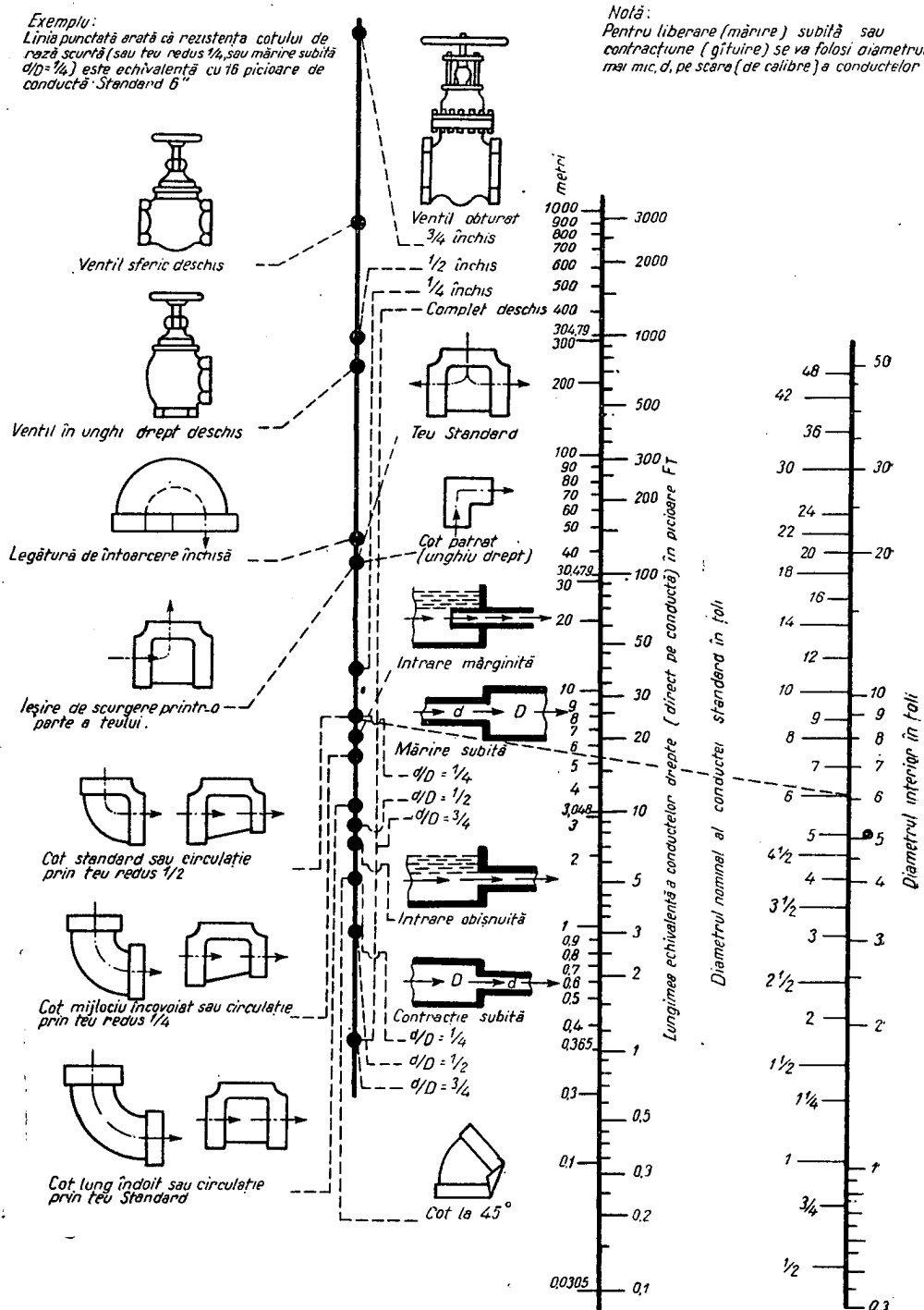
Pentru cazul I și II problemele se tratează în modul următor:

— se stabilește regimul de curgere prin valoarea numărului lui Reynolds din ecuația

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta}.$$

Valoarea obținută dacă este mai mare decît 2 320, se admite că curgerea este turbulentă și că dacă este mai mică decît această valoare, curgerea este laminară.

— În cazul curgerii laminare se folosește ecuația (90), în care înlocuindu-se toate valorile,



afară de necunoscuta L sau ΔP , după cum problema reprezintă cazul I sau II, problema se reduce practic la rezolvarea necunoscutei din ecuație.

Dacă numărul Reynolds este mai mare decât 2 320, se consideră că curgerea este turbulentă și se folosește ecuația (106), în care trebuie determinat coeficientul de pierdere de sarcină ΔP .

În cazul conductei rugoase, λ din ecuația (106) se determină după ecuația (112) în care se vede că λ este funcție de raportul coeficientului de rugozitate față de diametrul conductei.

În cazul conductei cu pereți lustruiți, coeficientul de pierdere λ se calculează ca o funcție de numărul lui Reynolds, după ecuațiile (109).

Prin determinarea lui λ ecuația (106) devine o ecuație cu o necunoscută L sau ΔP , după cazul I sau II.

Cazul III este mult mai complicat, întrucât numărul Reynolds cuprinzând și viteza și diametrul nu se poate determina înainte de a fi dimensionată conducta. Pentru rezolvarea problemei se admite o curgere turbulentă, dându-se diverse valori lui λ în ecuația (106). Ecuația explicită pentru diametrul d rezultă în felul următor:

$$\Delta P = \lambda \frac{1}{d} \frac{V^2}{2g}$$

în care

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2}$$

de unde

$$d^5 = \frac{16}{\pi^2 2g} \lambda \frac{Q^2 l \gamma}{\Delta P} \quad (117)$$

Introducând în această ecuație toate valorile date se alege o valoare λ oarecare (în jurul 0,03), diametrul d se determină extrăgând rădăcina a 5-a din valoarea constantă al termenului din dreapta egalității ecuației (117). Pe această bază se reia procedeul din cazurile I și II, obținându-se o nouă valoare λ , care se confruntă cu valoarea λ aleasă. Prin încercări succesive se va ajunge la o valoare apropiată între λ propus și λ găsit, care corespunde cu situația optimă a dimensionării conductei.

Cazul IV se poate rezolva simplu în momentul cînd se impune o anumită viteză de curgere și este analog cu cazul III, dacă această viteză de curgere urmează a fi determinată.

Pierderile de presiune ce au loc prin ventile schimbări de secțiune, coturi etc., se pot calcula și prin intermediul nomogramei din fig. 102. În funcție de un anumit diametru se obține lungimea echivalentă de conductă dreaptă.

1. Măsurări de debite

Tubul Venturi este o aplicație a curgerii în conductă folosindu-se la măsurarea debitelor. În acest caz, o formă bine studiată poate aduce un φ_c egal cu 1, dar în schimb coeficientul vitezei nefiind egal cu 1, este necesară o etalonare a aparatului.

Pentru a atinge randamente cât mai bune, este bine să se respecte anumite prescripții de construire: 1) unghiul de convergență înspre amonte 25–40° și cel de divergență 7°; 2) diametrul gîtului care servește drept orificiu, se construiește între 1/2 și 1/4 din diametrul conductei; 3) lungimea gîtului se face de obicei de 1/2 D și poate varia pînă la D ; 4) interiorul cât mai neted, se căptușește uneori cu foaie de alamă.

Aplicînd relația lui Bernoulli, $\frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}$ și legea continuității:

$$V_1 = \frac{S_2}{S_1} V_2 = m V_2$$

rezultă:

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{2g \frac{p_2 - p_1}{\gamma}} = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{2gh} = \alpha \sqrt{2gh}$$

În acest caz debitul este:

$$q = S_1 V_1 = \frac{S_1}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{2gh} = S_1 \alpha \sqrt{2gh}$$

Tubul Venturi corespunde ajutorului cu același raport al diametrelor, de intrare și ieșire. Avantajul acestuia constă în faptul că prelungirea conică la ieșirea din tub micșorează pierderea de presiune mai mult decât la diafragmă sau la ajutoraj.

Presiunea se ia în amonte și în secțiunea minimă, iar din raportul m între secțiuni și h , presiunea la manometru, se obține debitul, după formula de mai sus.

1. Curgerea peste un deversor. Problema debitului dat de deversori a fost o problemă mult studiată în Uniunea Sovietică și contri-

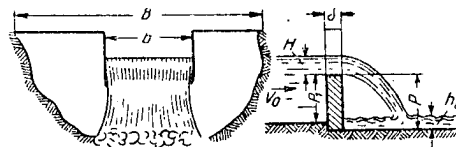


Fig. 103. Deversor cu prag lat.

buția oamenilor de știință sovietici: academici-anul G. F. Proskur, profesorul I. I. Nenko, A. I. Schwartz, V. G. Aivazian, V. B. Dulnev, N. A. Abramov, profesorul F. I. Pikalov, M. M. Protodiakonov, S. V. Sokolovski, A. S. Ofîterov, V. V. Vedernikov etc., în acest domeniu, este imensă.

Deversorii pot fi de mai multe feluri, după grosimea peretelui:

a) cu prag lat $\delta > (2 \div 3) H$; b) cu muchie ascuțită $\delta < 0,67 H$; c) cu profil practic $0,67 H < \delta < (2 \div 3) H$.

fragmă (fig. 109), cu diametrul d mm, care produce o reducere a raportului $m = \frac{d^2}{D^2} = \frac{s}{S}$. Creșterii de secțiune îi corespunde o creștere

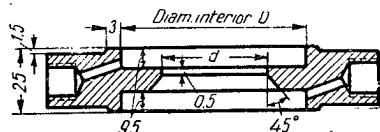


Fig. 109. Diafragmă normală 1930.

de presiune, măsurată la un manometru diferențial.

Din diferența de presiune $p_1 - p_2$ se pierde permanent o parte, după valorile din tabela 27.

Din diferența de presiune normală $p_1 - p_2$ (kg/m^2), măsurată la manometrul de presiune, adeseori sub forma unei coloane de lichid, $h = (p_1 - p_2)/\gamma$ (m), cu greutatea specifică $\gamma \text{ kg}/\text{m}^3$, rezultă:

$$G = \mu_0 \cdot \varepsilon d^2 \cdot 0,01252 \sqrt{(p_1 - p_2) \gamma} \quad (\text{kg}/\text{h})$$

coeficientul μ_0 depinde de raportul m , mai mult decât de Re_D .

Corecția de expansiune ține seamă de creșterea volumului de gaze și de vapori, încât $1 - \varepsilon$ este proporțional cu căderea relativă de presiune $(p_1 - p_2)/p_1$, și dependent de $\kappa = C_p/C_v$.

Re_D — reprezintă cifra lui Reynolds raportată la diametrul conductei.

m. Rezistența opusă corpurilor în mișcare de masă fluidă

Rezistența la înaintare a corpurilor se datorește, atât frecării superficiale, cât și formei lor care cauzează desprinderea curentului și producerea vîrtejurilor.

Considerînd rezistența R și coeficientul de rezistență C :

$$R = C \cdot S \cdot \frac{\rho V^2}{2} = C S p_d$$

în care p_d este presiunea dinamică iar S — suprafața frontală (normală pe viteză).

În general, C variază cu Re , și anume:

a) Dacă frecarea nu intervine prea mult rezultă că funcția $\text{Re } C = f(\text{Re})$ devine o constantă. (Cazul plăcilor care se deplasează perpendicular pe planul lor).

b). Dacă frecarea are un rol important (plăci deplasate în planul lor), acțiunea vizcozității fiind preponderentă, rezultă un C proporțional cu $\frac{1}{\text{Re}}$ adică $C = f\left(\frac{1}{\text{Re}}\right)$.

Rezistența unui corp care se mișcă într-un fluid, se poate împărți în două părți, rezistența de formă și rezistența de frecare.

Plecînd de la ideea că, dacă rezistența de formă depinde efectiv de forma corpului, pe cînd rezistența de frecare nu depinde în esență decât de suprafața corpului, s-a ajuns la ideea descompunerii rezistenței, într-o rezistență de formă și o rezistență de suprafață.

La cele două rezistențe se mai adaugă și o a treia, în cazul corpurilor care se mișcă libere pe suprafața unui fluid, aceasta numindu-se rezistență datorită undelor. Mișcarea undelor se face sub influența greutateii, și aici intervine legea similitudinii lui Froude.

Rezistența datorită undelor depinde de variațiile formei corpului, ale vitezei și ale adîncimii fluidului (se studiază în cazul vapoarelor).

3. Constatări experimentale asupra rezistenței ce-o opun fluidele la înaintarea corpurilor solide. Din încercările făcute asupra diferitelor corpuri, s-a putut determina coeficientul de rezistență C . Pentru corpurile care întîmpină o rezistență mare din partea fluidului, formarea suprafețelor de discontinuitate constituie cauza preponderentă.

a) Rezistența la un disc circular plan. Cînd curentul lucrează perpendicular pe disc, variațiile coeficientului de rezistență sînt mici pentru Re , între 2 000 și 500 000. Astfel, C variază între 1,10 și 1,12.

Pentru Re cuprins între 40 și 1 500, valorile rezistenței se determină greu, din cauza oscilațiilor. Pentru $\text{Re} = 110$ se ajunge la o cifră maximă, $C = 1,8$.

Sub $\text{Re} = 40$, se trece la legea de rezistență a lui Stokes, $C = \frac{10,2}{\text{Re}}$.

Tabela 27

T-uri despărțire										T-uri renuire														
q_2/q_1	0,3				0,5				0,7		0,3				0,5				0,7					
α	90°		45°		90°		45°		90°		45°		90°		45°		90°		45°					
d_2/d_1	0,58	1	0,58	1	0,58	1	0,58	1	0,58	1	0,58	1	0,58	1	0,58	1	0,58	1	0,58	1				
$h_{2...}$	1,8	0,88	0,35	0,56	3,2	0,92	0,6	0,4	5,6	1,02	0,32	0,3	0,7	0,15	0,31	0,16	1,9	0,3	1,38	0,12	3,7	0,6	2,85	0,30

Din rezultate experimentale s-a obținut
b) Rezistența unei sfere. Aici, variațiile lui C cu Re sînt mult mai mari.

În jurul lui $Re = 10^5$, C variază între 0,45 și 0,48 și scade pînă la 0,18 pentru $Re = 10^6$. Pentru Re mai mic decît 0,2 se aplică legea lui Stokes și, în acest caz, $C = \frac{12}{Re}$.

Tabela 28

Re	40	10	2,5	1
c	1,5	2,4	5,6	11,5

c) Rezistența cilindrilor. Cilindrii de revoluție se comportă în mod asemănător cu sfera.

Tabela 29

Re	0,1	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
c	120	14	2,6	0,75	0,42	0,45	0,44	0,18

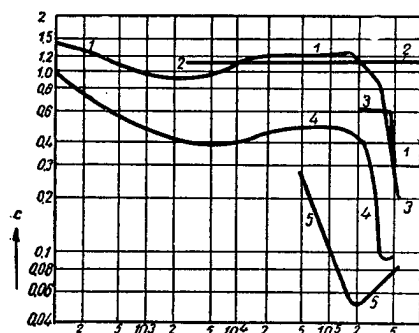


Fig. 110 Coeficientul de rezistență în funcție de numărul lui Reynolds:

1 — cilindru circular; 2 — disc circular; 3 — elipsoid turtit; 4 — sferă; 5 — elipsoid alungit.

La cilindrii lungi, unde lungimea $l > 100$ diametrul, rezistența scade de la 1,2 pînă la 0,3, în domeniul 10^5 și 10^6 . Dacă R este mic, în locul formulei lui Stokes se folosește:

$$c = \frac{4\pi}{Re (1,309 - \ln Re)}$$

Tabela 30

Re	0,1	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
c	34	6,5	2	1,3	0,92	1,20	1,15	0,35

d) Coeficienți de rezistență pentru corpuri de diferite forme

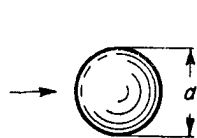


Fig. 111. Sferă,

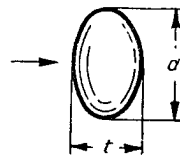


Fig. 112. Elipsoid alungit.



Fig. 113. Elipsoid turtit.

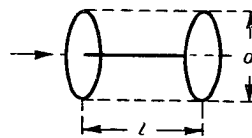


Fig. 114. Două discuri.

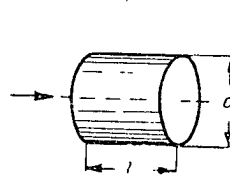


Fig. 115. Cilindru circular (baza perpendiculară pe direcția curentului).

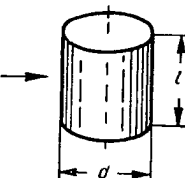


Fig. 116. Cilindru circular (generatoarea perpendiculară pe direcția curentului).

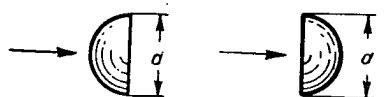
Fig. 117. Dreptunghi cu laturile a și b .

Fig. 118 și 119. Emisfera.



Fig. 120 a și b. Con.

n. Elemente de mașini hidraulice

Motoarele hidraulice transformă energia apei care cade de la înălțimea h , într-o energie disponibilă, la un arbore motor; la pompe, energia furnizată de un arbore motor servește la ridicarea apei la o înălțime h ; suflantele lucrează în mod asemănător, la un curent de aer (suflantele pentru diferențe foarte mici de presiune se numesc ventilatoare).

Turbinele transformă în putere utilă energia cinetică a apei care curge sub o diferență de presiune. Apa curgând rapid este introdusă fără șoc între paletelor turbinei, printr-un dispozitiv director și i se deviază astfel direcția, încât părăsește roata cu o viteză foarte mică. Deoarece în aceste fenomene nu se produc pierderi importante, rezultă că din totalul energiei cinetice conținute în apa care iese, cea mai mare parte poate fi recuperată de arborele turbinei.

După modul de transformare a energiei, sînt două tipuri de turbine: turbine cu acțiune sau cu impuls și turbine cu reacțiune.

În turbinele cu acțiune, energia potențială a căderii de apă este transformată înaintea roții,

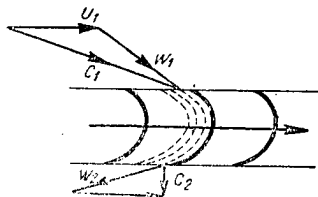


Fig. 121. Diagrama vitezelor la o turbină cu acțiune.

în energia cinetică, lăsînd apa să curgă liber prin ajutoare sau prin canale conducătoare.

Apa are o viteză absolută la intrare c_1 , rotorul se învîrtește cu viteza u_1 , iar viteza relativă este w_1 .

Tangenta la intrare a paletelor are direcția lui W_1 , și apoi apa este deviată de palete în direcția W_2 , unde, abstracție făcînd de pierderile provocate din cauza frecării superficiale, valoarea vitezei relative rămîne aceeași. Valoarea și direcția lui c_2 rezultă din adunarea vectorială a lui u_2 cu w_2 , în regimul cel mai favorabil, avînd poziția aproape perpendiculară pe sistemul paletelor.

În turbinele cu reacțiune nu se transformă în viteză decît o parte din căderea de apă, astfel încît apa intră în rotor cu o suprapresiune importantă. Detalii sînt date în fig. 122.

Turbinele cu reacțiune funcționează cu canalele paletelor complet pline, și viteza c_2 este în regimul optim de funcționare, perpendiculară pe planul rotorului (axială).

În turbinele cu acțiune, profilul paletelor este construit astfel ca apa să curgă de-a lungul paletelor, păstrînd un contact cu aerul, și paleta

fiind atinsă de apă numai într-o parte, frecarea va fi mai mică decît la un contact bilateral.

Neglijînd frecarea și efectele forței centrifuge în roată, se consideră $h = \frac{1}{2g} (c_1^2 + w_2^2 - w_1^2)$.

(La turbina cu acțiune se consideră $w_2 = w_1$, și deci diferența lor este nulă).

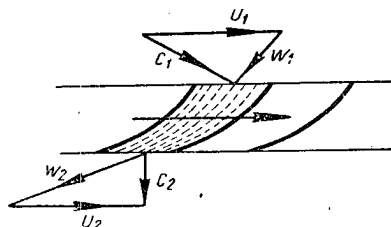


Fig. 122. Diagrama vitezelor la o turbină cu reacțiune

Cînd componentele tangențiale ale vitezei absolute de intrare și de ieșire sînt $c_1 \cos \beta_1$ și $c_2 \cos \beta_2$, sau c_{u1} și c_{u2} , cuplul pe arborele turbinei este $M = \rho Q (r_1 c_{u1} - r_2 c_{u2})$, și puterea utilă $L = M\omega$ (notînd $r_1 \omega = u_1$ și $r_2 \omega = u_2$) va fi:

$$L = \rho Q (u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}).$$

Pe de altă parte, $L = \eta L_0 = \eta \gamma Q h$ unde η_h este randamentul hidraulic, ținîndu-se seamă de $\gamma = \rho g$:

$$\eta_h = \frac{u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}}{gh}$$

cînd ieșirea este făcută perpendicular pe rotor, c_{u2} , dispăre și, în acest caz, $u_1 c_{u1} = \eta_h gh$.

Recentele teorii hidrodinamice asupra problemelor turbinelor, nu mai consideră spațiul dintre două palete ca un canal, ci consideră paletelor ca un număr de palete distincte, în lungul unui curent, și care se influențează

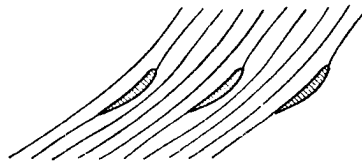


Fig. 123. Curgerea printr-o rețea de palete.

între ele. În construcțiile moderne, unde paletele sînt foarte distanțate, acest mod de a vedea lucrurile este conform cu realitatea. În acest caz, nu se pot egala direcțiile de intrare și de ieșire, cu unghiurile corespunzătoare ale aripii (după vechea teorie).

Unghiurile aripii reprezintă, aici, mai curînd devierile care se imprimă curentului de apă (fig. 123).

O roată cu acțiune modernă sau o roată cu deviație liberă plecînd de la principiul roții

Pelton, este formată din cupe alcătuite din două cochilii și în care viteza cea mai favorabilă este aproape jumătate din viteza apei înjet.

O formă obișnuită de roată cu reacțiune este aceea a turbinei Francis. Apa înconjură roata, intră în aceasta printr-o parte, și drumul ei se potrivește cu cel din fig. 122, și pe partea opusă intrării.

Cu turbina Kaplan s-a ajuns la obținerea unei viteze mari de drum, chiar cu înălțimi mici de cădere a apei. Aici se păstrează un distribuitor, ca și în cazul precedent, dar se produce o mișcare în spirală a apei, din exterior spre interior, și trecerea prin roată se face în direcție axială.

În general, la turbinele cu reacțiune, pentru a mai reduce energia pe care o are apa la ieșire, se mai folosește încă o conductă de aspirație, care urmărește, în cea mai mare parte, un profil conic.

Pentru adaptarea puterii turbinei la puterile necesare, se reglează cantitatea de apă admisă în turbină. Aceasta se face, în cea mai mare parte din timp, automat, și astfel încât viteza turbinei să fie menținută constantă.

Pompele hidraulice se bazează pe principiul roților înzestrate cu palete, care sînt oarecum

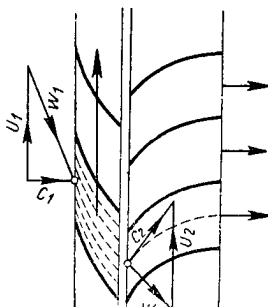


Fig. 124. Diagrama vitezelor la o pompă axială.

inversate față de cele ale turbinelor (în special turbinele cu reacțiune).

Pompele se împart în: pompe cu curent axial (pompe elicoidale) și pompe cu curent radial (pompe centrifuge), cărora le corespund suflantele axiale și centrifuge, pentru transportul aerului.

Pompele și suflantele axiale au construcția asemănătoare propulsoarelor cu elice; aici, energia mișcării de rotație, care se produce în rotorul pompei, poate fi transformată în cea mai mare parte în presiune, printr-o roată directoare (fig. 124).

La acțiunea centrifugă, în pompe și în suflante centrifuge se mai adaugă în canalele paletelor, și o creștere de presiune $\frac{\rho\omega^2}{2}(r_2^2 - r_1^2)$.

Paletele roții centrifuge pot fi radiale înclinate înapoi sau înainte. Cele curbate înapoi dau randamentele cele mai bune, dar cele curbate înainte dau presiunile cele mai mari.

Pompele de înaltă presiune și turbocompresoarele se compun din mai multe roți, parcurse în serie, și care au un sistem particular de roți directoare.

Puterea utilă a pompelor $L_0 = \gamma Q h$, în care Q este debitul — volum și h — înălțimea totală de ridicare. Acolo unde lucrul mecanic de compresie poate fi neglijat ca neînsemnat, h se înlocuiește cu diferența presiunilor statice, înainte și după suflantă, $p_2 - p_1$, și deci:

$$L_0 = Q (p_2 - p_1).$$

Dacă se aspiră printr-o conductă nu prea lungă, într-un spațiu cu presiunea p_0 , se va considera $p_1 = p_0 - \frac{\rho}{2} c^2$, în care c este viteza medie de aspirație. Energia cinetică, la ieșirea din suflantă poate fi recuperată printr-un difuzor, care, printr-o contrapresiune constantă, reduce presiunea p_2 , la ieșirea din suflantă.

La suflantele pentru diferența de presiune mai mari, pentru care lucrul de compresie nu poate fi neglijat, se pot utiliza formulele corespunzătoare, stabilite pentru compresoarele cu piston.

Puterea motorului L este mai mare decât L_0 , din cauza pierderilor prin frecare și randamentul $\eta = \frac{L_0}{L}$.

Dacă, făcînd abstracție de pierderile prin frecare din lagăre, se calculează cuplul M după ecuația lui Euler, atât pentru roțile elicoidale, cît și pentru cele centrifuge, de cele mai multe ori c_{u1} este egal cu 0 și se obține:

$$M = \rho Q r_2 c_{u2},$$

și cum $r_2 \omega_2 = u_2$, se găsește $L = \rho Q u_2 c_{u2}$.

Dacă $L_0 = \eta L$ și ținînd seamă de faptul că $L_0 = \gamma Q h$, se obține:

$$h = \frac{\eta u_2 c_{u2}}{g}$$

în care c_{u2} se determină din triunghiul vitezei și η se apreciază la o valoare din practică.

CAPITOLUL II

HIDRAULICA SUBTERANĂ

A. GENERALITĂȚI ȘI PRINCIPII DE BAZĂ ALE HIDRAULICEI SUBTERANE

a. Generalități

Hidraulica subterană este știința care cercetează și urmărește mișcarea țițeiului, a gazelor și a apei, în strate alcătuite din roci poroase și fisurate. Această știință ar putea fi denumită mai larg: «studiul hidromecanic al lichidelor și al gazelor în medii poroase».

Spre deosebire de hidraulica generală, în zăcămint intervin procese complicate de curgere a gazelor și a țițeiului, întru cât trebuie luate în considerație în întregime influențele directe și indirecte ale fenomenelor superficiale, datorite diametrului redus al porilor.

Variațiile de temperatură și de presiune, cum și proprietățile fizico-chimice care rezultă pentru fluidele din zăcămint (ieșirea gazelor din soluție, viscozitățile, etc.) leagă hidraulica de un studiu fizic riguros al zăcămintului.

Din punctul de vedere istoric, hidraulica subterană poate fi împărțită în două perioade:

În prima perioadă, care începe pe la mijlocul secolului trecut și ține pînă la 1920, hidraulica s-a ocupat cu probleme de alimentare cu apă, de irigații și de construcții hidraulice, adică problemele rezolvate au fost numai în legătură cu alimentarea puțurilor de apă sau cu galeriile de colectare a apelor etc.

A doua perioadă începe în 1921 prin enunțarea, tratarea și rezolvarea unor probleme cu aplicații în domeniul petrolului care au fost făcute de acad. L. C. Leibensohn.

Hidraulica subterană a evoluat cu o serie mare de lucrări dintre care unele erau aplicate mai mult hidrogeologiei și hidrotehnice (lucrările lui Kamenski și Polubarinova-Kocina).

Lucrările lui Leibensohn, Pihacev, Scelkacev au însă aplicații imediate și foarte importante în domeniul petrolului.

După 1930, hidraulica subterană devine o știință de sine stătătoare și în 1941 este introdusă ca obiect de studiu în Institutele de Petrol din U.R.S.S., iar în 1950, în Institutul de Petrol și de Gaze din R.P.R.

Explicația dezvoltării acestei științe în U.R.S.S. constă în faptul că economia socialistă permite introducerea metodelor de exploatare științifică, zăcămintul aparținând în întregime Statului, pe cînd în economia capitalistă, zăcămintul este parcelat și aparține mai multor proprietari, cu interese diferite, ceea ce împiedică o exploatare rațională.

b. Considerarea zăcămintului de țiței și de gaze ca un tot întreg

1. Raza de drenaj. Înainte de cercetarea științifică a zăcămintelor de petrol și de gaze, se considera că raza de acțiune (drenaj) a unei sonde era limitată la o anumită valoare.

Savanții sovietici N. I. Lindtrop, N. M. Cearnighin, A. N. Sniderov, au demonstrat științific și au verificat pe teren că:

a) între sonde există o puternică interacțiune, care are loc uneori pe distanțe mari, de 1–2 km, și mai mult;

b) exploatarea unei părți dintr-un zăcămint influențează zăcămintul în întregime, încît în analiza hidrodinamică nu se studiază separat problemele care se referă la o singură sondă, ci comportarea în întregul zăcămint a apei, țițeiului, și gazelor.

Pe aceste considerente (a și b) Scelkacev și Pihacev au stabilit teoretic și experimental, că oprirea și pornirea unei sonde determină modificări sensibile la sondele din jur (modificări de presiune, modificări de debit etc.).

2. Energiile de zăcămint. Formele de energie care provoacă curgerea țițeiului în zăcămint sînt: 1) energia de compresiune; 2) energia gravitațională; 3) energia superficială. Factorii care condiționează energia totală a unui zăcămint sînt următorii: 1) forma și dimensiunile zăcămintului și a apei marginale; 2) volumele de fluide conținute; 3) proprietățile fizice ale fluidelor de zăcămint și din zona apei marginale precum și proprietățile fizice ale rocii; 4) presiunea și temperatura zăcămintului.

În legătură cu energiile menționate se poate spune că:

1) Energia de compresiune:

— Între presiunea inițială și presiunea de saturație, energia de compresiune a țițeiului și

a) apei interstițiale din zăcămint și a rocii provoacă curgerea țiteiului și duc, în general, la un factor de recuperare redus.

— Energia de compresiune a gazelor poate provoca curgerea țiteiului în două condiții: a) prin expansiunea gazelor comprimate în capul de gaze, ca urmare a scăderii presiunii de zăcămint; b) sub presiunea de saturație, gazele ieșind din soluție, acestea își vor mări volumul în măsura scăderii presiunii de zăcămint. Expansiunea gazelor ieșite din soluție va provoca curgerea țiteiului și va constitui o importantă formă de energie în exploatarea zăcămintelor de țitei.

— Energia provocată de destinderea elastică a zonei de apă marginală duce la înlocuirea parțială a fluidelor extrase din zăcămint și constituie de asemenea o importantă formă de energie de zăcămint.

2) Energia gravitațională acționează în mod continuu asupra țiteiului din zăcămint, debitul

în acest caz fiind proporțional cu diferențele dintre pătratele nivelelor țiteiului din zăcămint și de la gaura de sondă.

3) Energia superficială provoacă, în general, curgerea fluidelor prin medii poroase numai în anumite condiții (migrarea țiteiului între zone cu proprietăți fizice diferite).

c. Unități de măsură și analogii

Proprietățile fizice mai detaliate ale țiteiului, ale apei și ale gazelor sînt tratate în capitolele «Fizica zăcămintului» și «Hidraulica generală».

1. Unitățile de măsură ce sînt folosite în toate calculele practice în hidraulica subterană, conform tabelului 1, se numesc unități de măsură mixte.

2. Între hidrodinamica curgerii prin medii poroase și alte ramuri ale fizicii există o analogie, întrucît ecuațiile diferențiale fundamentale au aceeași formă (v. tabelul 2).

Tabela 1. Comparație între sistemele de măsură MKS, CGS și Mixt

	Sistemul de unități		
	Tehnic MKS	Fizic *) cm g s	Mixt cel mai des folosit în hidraulica subterană
Coefficientul de permeabilitate k	m^2	cm^2	D
Lungimea L	m	cm	cm
Suprafața F	m^2	cm^2	cm^2
Viteza de filtrare v	m/s	cm/s	cm/s
Debitul Q	m^3/s	cm^3/s	cm^3/s
Presiunea p	kg/m ²	dyn/cm ²	kg/cm ²
Viscozitatea (abs) μ	kg/s/m ²	dyn s/cm ² = poise (p)	centipoise = 0,01 dyne s/cm ² (c p)
Viscozitatea cinematică ν	m ² /s	cm ² /s = stokes (st)	centistokes = 0,01 cm ² /s = (C St)
Greutatea specifică γ	kg/m ³	dyn/cm ³	kg/cm ³
Densitatea (masă specifică) ρ	Kg s ² m ⁻⁴	g/cm ³	= Kg s ² cm ⁻⁴

Tabela 2. Legătura între curgerea prin medii poroase și alte fenomene fizice

Curgerea staționară prin medii poroase			Curgerea nestacionară a lichidului compresibil	Transmisia căldurii	Electrostatică	Curgerea curentului într-un mediu dielectric
Lichid incompresibil	Lichid compresibil	gaze ideale				
Presiunea p	masă specifică ρ	$\frac{1+b_0}{p}$	ρ	Temperatura T	Potențial electrostatic Φ	Voltajul V
Permeabilitate Viscozitate $= \frac{k}{\mu}$	$\frac{k}{\mu}$	$\frac{k}{\mu}$	$\frac{k}{\mu}$	Conductibilitate termică C	Constantă dielectrică $\frac{\epsilon}{4\pi}$	Conductibilitate specifică $\frac{\sigma}{\epsilon}$
Legea lui Darcy $\bar{v} = -\frac{k}{\mu} \nabla p$	Legea lui Darcy $\rho \bar{v} = -\frac{k}{\mu} \rho \nabla p$	Legea lui Darcy $\rho \bar{v} = -\frac{K}{\mu} \rho \nabla p$	Legea lui Darcy $\rho \bar{v} = -\frac{K}{\mu} \rho \nabla p$	Legea lui Fourier $\bar{q} = -C \nabla T$	Legea lui Maxwell $\frac{\epsilon}{4\pi} \bar{E} = \frac{\epsilon}{4\pi} \nabla \Phi$	Legea lui Ohm $I = -\sigma \nabla V$
Viteza $\rho \bar{v}$	Viteza masică $\rho \bar{v}$	Viteza masică $\rho \bar{v}$	Viteza masică $\rho \bar{v}$	Curent de căldură \bar{q}	Intensitatea cîmpului \bar{E}	Intensitatea cîmpului I
Suprafața $p = \text{const}$ (izobare)	Suprafețe $\rho = \text{const}$ (egală masă specifică)	Suprafețe $\frac{1+n}{p} = \text{const}$	Suprafețe $\rho = \text{const}$ (egală masă specifică)	Suprafețe $T = \text{const}$ (izoterme)	Suprafețe $\Phi = \text{const}$ (echipotențiale)	Suprafețe $V = \text{const}$ (echipotențiale)

d. Sistemele de coordonate

Pentru numeroase probleme din hidraulica subterană, unde se pot presupune condiții speciale de simetrie, se va exprima ecuația lui Laplace, în alte sisteme de coordonate decît cel cartezian (x, y, z) .

Ecuația lui Laplace (din capitolul « Hidraulica generală »):

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

în care Φ reprezintă potențialul vitezei, va fi redată în alte sisteme de coordonate:

1. **Coordonate cilindrice.** (r, θ, z) . Din figura (1) rezultă următoarele relații între coordo-

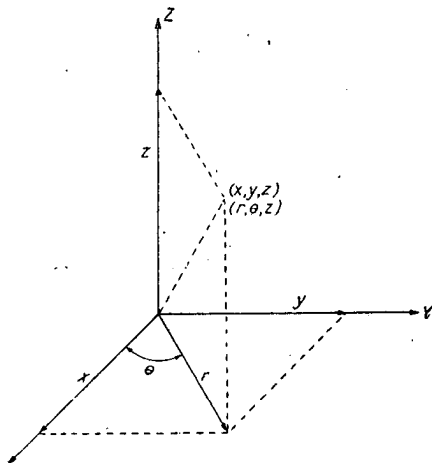


Fig. 1. Sistem de coordonate cilindrice.

nate carteziene (x, y, z) și coordonate cilindrice (r, θ, z) .

$$\left. \begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2}; \quad \theta = \arctg \frac{y}{x}; \quad z = z \\ x &= r \cos \theta; \quad y = r \sin \theta; \quad z = z \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

iar vitezele

$$\left. \begin{aligned} v_r &= -\frac{\partial \Phi}{\partial r}; \quad v_\theta = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \\ \text{și } v_z &= -\frac{\partial \Phi}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Din ecuațiile de mai sus (1), (2) și (3) ecuația lui Laplace devine în coordonate cilindrice de forma

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \Phi &= \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \\ &+ \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2. **Coordonate sferice.** (r, θ, φ) . Din figura (2) rezultă relațiile următoare între coordonatele carteziene x, y, z și coordonatele sferice (r, θ, φ) .

$$\left. \begin{aligned} (r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad \theta = \arctg \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}; \\ \varphi &= \arctg \frac{y}{x} \\ x &= r \sin \theta \cdot \cos \varphi; \quad y = r \sin \theta \cdot \sin \varphi; \\ z &= r \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

iar vitezele

$$\left. \begin{aligned} v_r &= -\frac{\partial \Phi}{\partial r}; \quad v_\theta = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \\ \text{și } v_\varphi &= -\frac{1}{r \sin \theta} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Datorită relațiilor (5) și (6) ecuația lui Laplace (1) capătă forma următoare în coordonate sferice:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \Phi &= \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \\ &+ \frac{1}{r^2 \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) + \\ &+ \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

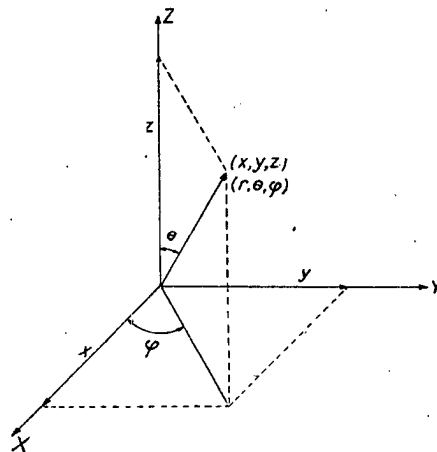


Fig. 2. Sistem de coordonate sferice.

3. **Coordonate curbilinii.** Se ia un sistem de coordonate curbilinii, (fig. 3) determinat de intersecțiile a trei familii de suprafețe ortogonale α, β și γ , astfel încît $\alpha = \alpha(X, Y, Z) = \text{const.}$, $\beta = \beta(X, Y, Z) = \text{const.}$ și $\gamma = \gamma(X, Y, Z) = \text{const.}$, în care fluxul corespunzător vectorului vitează \vec{v} și elementului diferențial de volum ds_1, ds_2, ds_3 este

$$ds_1 \cdot ds_2 \cdot ds_3 \cdot \text{div } \vec{v}.$$

Notînd rapoartele dintre variațiile diferențiale ale elementelor de coordonate ds_1 , ds_2 ,

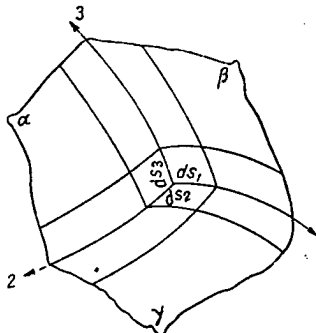


Fig. 3. Sistem de coordonate curbilinii.

ds_3 și coordonatele α , β , γ cu h_1 , h_2 , h_3 , definite de:

$$\left. \begin{aligned} d\alpha &= h_1 \cdot ds_1 \\ d\beta &= h_2 \cdot ds_2 \\ d\gamma &= h_3 \cdot ds_3 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

expresia divergenței devine:

$$\text{div. } \bar{v} = h_1 h_2 h_3 \left[\frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{v_1}{h_2 \cdot h_3} \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{v_2}{h_3 \cdot h_1} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\frac{v_3}{h_1 \cdot h_2} \right) \right] \quad (9)$$

Ținînd seama de faptul că $\bar{v} = \nabla \Phi$

$$\text{div. } \bar{v} = \nabla^2 \Phi = \left[h_1 h_2 h_3 \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{h_1}{h_2 \cdot h_3} \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{h_2}{h_3 \cdot h_1} \frac{\partial \Phi}{\partial \beta} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\frac{h_3}{h_1 \cdot h_2} \frac{\partial \Phi}{\partial \gamma} \right) \right] \quad (10)$$

Prin egalarea cu zero a ecuației (10) se obține ecuația lui Laplace, în coordonate curbilinii, iar aspectele particulare ale acestora sînt reprezentate de ecuațiile (4) și (7).

c. Presiuni hidraulice și mecanice reduse

Dacă se consideră (v. fig. 4) planul vertical XOZ și, în el, un element de strat ABCD, cotele celor două puncte E și F față de axa OX fiind Z_E și Z_F , se obțin înălțimile de presiuni reduse:

$$h_E = \frac{p_E}{\gamma} + Z_E \quad (11)$$

$$h_F = \frac{p_F}{\gamma} + Z_F \quad (12)$$

sau presiunile reduse:

$$p_E^* = p_E + \gamma Z_E = \gamma h_E \quad (13)$$

$$p_F^* = p_F + \gamma Z_F = \gamma h_F \quad (14)$$

Aceasta explică de ce, în același strat, presiunile de fund sînt diferite la sondele care se găsesc mai sus sau mai jos de structură, chiar dacă fluidul se află în strat într-un echilibru static.

Presiunile reduse se micșorează și ele dacă fluidul curge și pot fi egale în punctele E și E*, sau F și F*, dacă planul de referință OX este cuprins în interiorul curentului, iar fluidul este omogen. În practică, se ia ca plan de referință, fie nivelul mării, fie contactul apă-țitei.

În lucrările practice, se ține seama și de faptul că în cazul a două lichide de greutatea specifice diferite aflate în strat, greutatea specifică γ nu este totdeauna aceeași și de aceea, presiunile se exprimă în m coloană de apă (cu greutatea specifică $\gamma = 1 \text{ kg/dm}^3$).

Pentru zăcămintele de gaze, γ fiind neglijabil, presiunea redusă nu se mai deosebește practic de presiunea reală și ele vor fi considerate

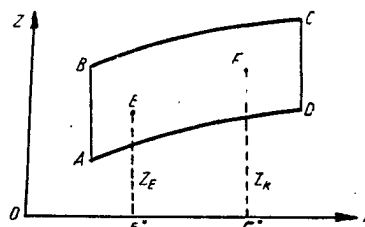


Fig. 4. Secțiune verticală printr-un element de strat.

egale, indiferent de poziția planului în care se află.

În vederea studiului curgerii în plan, curbele de aceeași presiune (izobare) se trasează astfel, încît diferența de presiune dintre două izobare vecine să rămînă constantă.

Liniile de curent trebuie astfel trasate ca între două linii de curent oarecare să existe permanent același debit.

Totalitatea liniilor de curent și a izobarilor reprezintă, într-un plan, cîmpul hidrodinamic al curgerii.

B. CURGEREA FLUIDELOR OMOGENE PRINTR-UN MEDIU POROS

a. Elemente și noțiuni de bază

1. Mediul poros este caracterizat prin prezența unui spațiu liber între particulele de rocă. Continuitatea și mărimea acestui spațiu sînt în funcție de forma, de mărimea și de așezarea particulelor de nisip. (v. și structura rocilor colectoare).

Din punct de vedere al studiului teoretic și practic se disting mai multe medii poroase.

a) Mediul poros ideal este considerat ca fiind format dintr-un fascicul de tuburi cilindrice, fig. (5), ale căror axe sînt paralele și rectilinii.

b) *Mediul poros fictiv*, care se presupune că este format din particule sferice cu diametru egal, așezate astfel, încât centrele acestor sfere să se afle în colțurile unui element de

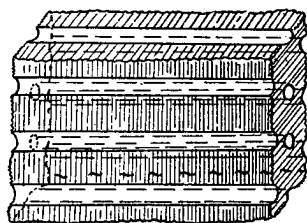


Fig. 5. Mediul poros fictiv.

volum (cub sau romboedru, cu diferite variații de unghi) v. fig. 6 și 7 Cap. III.

În acest caz, porozitatea variază după aranjamentul geometric al sferelor, care pot ajunge la un minimum, într-un aranjament romboedric, sau la un maximum, într-un aranjament cubic, (vezi tabela 3).

Tabela 3. Porozitatea la un aranjament cu sfere uniforme

Aranjamentul	Cubic	Romboedric
Volumul unei cavități.....	8,00 R ³	5,66 R ³
Volumul unui por.....	3,81 R ³	1,47 R ³
Porozitatea.....	47,64 %	25,95 %

c) *Mediul poros natural* este mult diferit de cel ideal și de cel fictiv, variind ca formă și ca așezare în funcție de aranjament, cum și de natura geometrică a materialului.

Acest mediu poate fi constituit din: pământuri fine, nisipuri consolidate, nisipuri neconsolidate, gresii și calcare, conglomerate slab cimentate, etc.

Pentru a se putea aprecia influența mediului poros asupra curgerii, este suficient să se arate

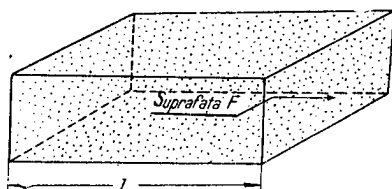


Fig. 6. Mediul poros.

că suprafața canalelor formate din pori, într-un metru cub de nisip, cu porozitatea de 20%, și cu raza particulelor de 0,1 mm, este de 24 000 m² adică 2,4 ha.

O astfel de suprafață implică frecări foarte mari ale fluidelor, în timpul curgerii acestora.

2. *Viteza de filtrare fictivă și viteza reală.* Dacă se consideră un mediu poros, cu secțiunea F și lungimea l , conform figurii (6) și se presupune că debitul care trece prin acest mediu poros, este Q , viteza de filtrare (fictivă) v este:

$$v = \frac{Q}{F}$$

Această viteză se numește viteză de filtrare (fictivă), întrucât la determinarea ei se presupune că mediul poros ar fi lipsit de porozitate ($m=1$), și curgerea s-ar face ca într-o conductă.

Viteza de filtrare reală v_1 va rezulta din împărțirea debitului q la secțiunea reală S (care reprezintă suprafața liberă a canalelor formate din pori) care este egală cu $F \times m$.

Altfel:

$$v_1 = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{F} = \frac{v}{m} \quad (15)$$

de unde rezultă că viteza reală de filtrare v_1 este mai mare decât viteza de filtrare.

b. Legile filtrării

1. *Legile filtrării prin medii poroase fictive.* (Legile teoretice și generalizarea lor). Slichter a imaginat o rocă fictivă, pe care, pentru a-i putea aplica legea lui Hagan-Poiseuille, a presupus-o constituită din canale capilare cu secțiunea transversală egală cu secțiunea cea mai îngustă a canalului real și cu lungimea egală cu lungimea muchiei romboedrului elementar.

Aplicând ecuațiile găsite pentru fluide reale în cazul regimului laminar de curgere în conducte, (vezi cap. hidraulică generală):

$$v = \frac{\gamma d^2}{32\mu} \frac{\Delta p}{l} \quad (16)$$

în care:

v este viteza fluidului;

γ — greutatea specifică a fluidului;

d — diametrul conductei;

μ — viscozitatea absolută;

Δp — pierderea de presiune din cauza frecării;

l — lungimea conductei.

Prin înlocuirea diametrului d al conductei

prin secțiunea $F = \frac{\pi}{4} d^2$, formula (16) devine:

$$v = \frac{F}{8\pi\mu} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (17)$$

Întrucât determinarea lui v depinde de F , se va înmulți F — secțiunea roci, cu n — coeficientul de secțiune liberă. Astfel pentru cazul unor conducte cu secțiune triunghiulară curbilinie, Slichter obține:

$$v = \frac{nd^2}{96(1-m)} \cdot \frac{\Delta p}{\mu l} \quad (18)$$

în care $n = \frac{\text{secțiunea de trecere a fluidului}}{\text{secțiunea mediului poros}}$;
 m — porozitatea.

Astfel se poate calcula debitul

$$q = \frac{n^2 d^2 F \cdot \Delta p}{\mu 96 (1-m) l} = \frac{d^2 F \Delta p}{96 \mu l} \cdot \sigma$$

în care $\sigma = \frac{1-m}{n^2}$.

Considerind că

$$\frac{1}{\sigma} = 1,025 \cdot m^{3,3}$$

valoarea debitului devine:

$$Q = 0,01068 \frac{d^2 m^{3,3} F}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (19)$$

Supozițiile făcute însă pentru rezolvarea analitică au condus la o serie de nepotriviri cu rezultatele experimentale.

Pentru cazul unei roci ideale, cu volumul porilor egal cu acela al canalelor, Leibensohn a formulat ecuația:

$$Q = \frac{d^2 m F}{2 (1-m)^2 \mu} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (20)$$

iar Terzaghi, pentru o serie de site suprapuse, ecuația:

$$Q = c \left(\frac{m - m_0}{\sqrt[3]{1-m}} \right) \frac{d^2 F}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (21)$$

în care $m_0 = 0,13$ și c , o constantă, cu valoarea $c = 10,5$ pentru nisipuri cu suprafața netedă și $c = 6$ pentru nisipuri neregulate.

Din toate încercările făcute pentru diferite ipoteze se ajunge la o generalizare a legilor, în sensul că viteza v este proporțională cu pătratul diametrului efectiv d al particulelor cu gradientul de presiune și invers proporțională cu viscozitatea absolută μ a fluidului:

$$v = a \cdot \frac{d^2}{\mu} \text{ grad } P \quad (22)$$

a fiind un coeficient de proporționalitate.

2. Legea liniară de filtrare sau legea lui Darcy. a) Coeficientul de filtrare k_f . Legea lui Darcy a fost formulată în 1856 și a fost studiată în legătură cu filtrele de nisip, pentru puțurile de apă.

Prin experiențe (fig. 7) se măsoară debitul de apă ce se scurge din vasul 1 în vasul 2, trecând printr-un filtru debit exprimat prin relația:

$$q = k_f \frac{F \cdot \Delta p}{\gamma \cdot \Delta L} \quad (23)$$

în care:

q este debitul de fluid care trece prin mediul poros de secțiune F ;

Δp — diferența de presiune dintre presiunea p_1 la intrarea și presiunea p_2 la ieșirea fluidului;

L — lungimea filtrului și

k_f — coeficient de filtrare.

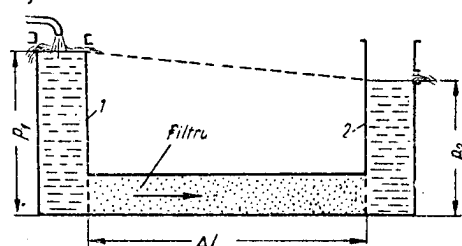


Fig. 7 Schema aparatului lui Darcy.

Pentru a calcula viteza din ecuația (21), considerind $\frac{\Delta p}{\gamma \Delta l} = i$ (panta hidrostatică), se împarte q la F și se obține:

$$v = k_f \times i \quad (24)$$

sau

$$v = \frac{k_f}{\gamma} \frac{dp}{dl}$$

de unde rezultă că, pentru o pantă egală cu unitatea ($i = 1$), viteza de filtrare este chiar coeficientul de filtrare.

Întrucât i reprezintă un număr fără dimensiuni, coeficientul k_f are dimensiunile unei viteze. k_f obținut experimental a fost verificat cu valoarea obținută teoretic, iar pentru determinarea lui s-au dat numeroase formule practice.

b) Permeabilitatea *) unui mediu poros. Prin permeabilitatea unui mediu poros se înțelege capacitatea acestui mediu de a permite trecerea prin el a unui debit de fluid. (v. « Fizica zăcămintului »).

Analitic, se pleacă de la legea lui Darcy: după ecuația (22)

$$v = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l} \quad (25)$$

de unde rezultă că viteza este direct proporțională cu permeabilitatea mediului poros.

Dimensiunile permeabilității sînt acelea ale unei suprafețe (v. tabela 1).

Legătura dintre coeficienții de permeabilitate ai celor trei sisteme din tabela 1 este:

$$\begin{aligned} K_{\text{mixt}} &= 1,02 \cdot 10^{-8} K_{\text{C.G.S.}} = \\ &= 1,02 \cdot 10^{-12} K_{\text{M.K.S.}} \end{aligned} \quad (26)$$

*) În locul permeabilității ar trebui să se spună coeficient de permeabilitate.

Coeficientul de filtrare rezultă din raportarea vitezele din ecuațiile (24) și (25), în funcție de permeabilitatea k :

$$k_f = \frac{k}{\mu} \gamma \quad (27)$$

c) *Domeniul de valabilitate a legii lui Darcy.*
1) Valabilitatea legii lui Darcy pentru curgerea lichidelor. Din experiențele făcute s-a constatat că valabilitatea legii lui Darcy este limitată până la anumite viteze critice. Astfel, la viteze mari, obținute în medii poroase (formate din nisipuri grosolane, sau din particule mari), s-a constatat că legea lui Darcy nu mai este valabilă.

Tabela 4. Rezultatele experimentale ale vitezei critice de filtrare a apei

Diametrul particulelor d , în mm	Viteza critică de filtrare, în cm/s	Panta hidrolică i
0,57	1,03	6,67
0,90	0,61	1,63
1,35	0,35	0,54

Pentru a se putea deduce legea generală a curgerii pe baza analizei dimensionale, se examinează variația presiunii, Δp într-o coloană de nisip cu lungimea ΔS , prin care trece un fluid de masă specifică ρ și viscozitatea μ , cu o viteză v . Se obține astfel relația:

$$\Delta p = \text{const} \frac{\mu^2}{\rho d^2} F\left(\frac{d \cdot v \cdot \rho}{\mu}\right) \Phi\left(\frac{\Delta S}{d}\right) \quad (28)$$

în care F și Φ , sint funcții necunoscute, cari se determină experimental.

Funcția Φ este la puterea I-a și reprezintă un raport între lungimea ΔS a conductei de nisip și diametrul d al acesteia. Ea poate fi practic asimilată chiar cu argumentul ei

$$\left(\frac{\Delta S}{d}\right)$$

Deoarece conform experiențelor făcute la curgerea prin mediul poros are loc la viteze mici și la valori mici ale lui ρ și d , funcția F , care reprezintă numărul lui Reynolds, este egală cu argumentul ei, relația (28) se transformă în:

$$\frac{\Delta P}{\Delta S} = \text{const} \frac{\mu^2}{\rho d^3} F\left(\frac{d \cdot v \cdot \rho}{\mu}\right) = \text{const} \frac{\mu v}{d^2} \quad (29)$$

Curgerea fluidului este însă laminară sau turbulentă, în funcție de valoarea numărului lui Reynolds; astfel la curgerea în conducte pentru valori ale lui Re mai mari decît 2300, se ajunge la o curgere turbulentă, care are forma:

$$\text{grad } P = \frac{\Delta P}{\Delta S} = \text{const} \frac{\rho v^2}{d} \quad (30)$$

în care grad P este independent de viscozitatea μ .

Prin analogie cu procesul curgerii fluidelor prin conducte și ținînd seama că neregularitatea canalelor existente într-un mediu poros determină o trecere treptată de la curgerea laminară la cea turbulentă, s-a ajuns la reprezentarea lui $\frac{\Delta P}{\Delta S}$ ca o sumă de termeni a mai multor puteri ale vitezei v (măsurată ca un raport al debitului la secția mediului poros)

$$\frac{\Delta P}{\Delta S} = av + bv^n, \quad (31)$$

în care a și b sint niște constante, iar n , un exponent.

S-a mai presupus relația (31) și sub forma particulară cu $a = 0$

$$\frac{\Delta P}{\Delta S} = bv^n \quad (32)$$

în care n variază între 1 și 2, n fiind egal cu 1 la curgerea laminară și cu 2, la curgerea turbulentă.

Din ecuațiile de mai sus rezultă că:

— la viteze mici și la Re mici, gradientul de presiune variază strict liniar și cu viteza v ;

$$\frac{\Delta P}{\Delta S} = \text{const } v \quad (33)$$

— dacă Re crește, $\frac{\Delta P}{\Delta S}$ ia valori din ce

în ce mai mari, ca în relațiile (31) și (32).

Din experiențele făcute în cazul nisipurilor consolidate, s-a constatat că λ , coeficientul de rezistență hidrolică, formulat de curgerea fluidelor în conducte:

$$\lambda = \frac{2d \Delta P}{l \rho v^2}$$

scade strict liniar pînă la valoarea $Re = 1$ (v. fig. 24 Cap. III) conform relației:

$$\ln \lambda = a - \ln Re \quad (34)$$

În această relație, $d = \sqrt[3]{\frac{\sum n_s \cdot d_s^3}{\sum n_s}}$, d_s fiind media aritmetică dintre ochiurile a două site consecutive, iar n_s numărul de grăunțe cu diametrul d_s găsite pe fiecare sită.

Din figura 24, Cap. III reiese că variația lui λ față de Re are loc după o curbă, de îndată ce Re ia valori în general mai mari decît 1, deși experiențele au fost făcute cu diverse medii poroase și diverse fluide.

Din aceleași experiențe efectuate cu nisipuri neconsolidate, rezultă că ecuația liniară a lui Darcy este valabilă pînă la $Re \ll 4$.

Valoarea lui Re , în punctul în care alura curbei reprezentată în fig. 10 se modifică brusc, se numește critică (Re_{cr}) punct la care corespunde o viteză critică (v_{cr}).

O experiență făcută cu apa care trece printr-un pietriș cu un diametru uniform este reprezentată în curba din fig. 25, Cap. III, care exprimă legătura dintre Re și $Re\lambda$.

Pentru partea dreaptă a cubei din fig. 25, considerând a — distanța de la urma ordonatei la origină și b — coeficientul unghiular, se ajunge la o ecuație de forma:

$$Re\lambda = a' + b'Re \quad (35)$$

în care, înlocuind valorile lui Re și λ se obține:

$$\frac{\Delta P}{\Delta S} = av + bv^2 \quad (36)$$

$$\text{în care } a = \frac{2a'\mu}{d^2} \quad \text{și} \quad b = \frac{2b'\rho}{d} \quad (37)$$

Profesorii M. A. Velicanov și E. Celcaliuc recomandă această formulă, pentru toate cazurile când Re are valori mai mari decât Re critic.

Academicianul N. N. Pavlovski pornind de la curgerea lichidelor în conducte circulare, exprimă numărul lui Reynolds pentru curgerea în medii poroase sub forma

$$Re = \frac{1}{0,75m + 0,23} \cdot \frac{vd_e}{v} \quad (38)$$

în care:

- m este porozitatea;
- v — viteza medie de curgere a lichidului;
- ν — viscozitatea cinematică;
- d_e — diametrul efectiv al particulei medii, de unde se obține ecuația vitezei critice:

$$v_{cr} = (0,75m + 0,23) \frac{v}{d_e} Re_{cr} \quad (39)$$

Din experiențele făcute, acad. Pavlovski a găsit că valoarea critică a lui Re variază între 7,5—9.

Dificultatea acestei ecuații constă în faptul că diametrul efectiv d_e este foarte dificil de calculat.

Scelkacev propune definirea lui Re sub forma:

$$Re = \frac{10}{m^{2,3}} \times \frac{v\sqrt{k}}{v} \quad (40)$$

(v , k și ν se iau în unități c.g.s.)

care este mai avantajoasă decât celelalte fiindcă nu depinde de d_e . Din experiențe rezultă că Re_{cr} are valori cuprinse între 1 și 12.

Trebuie menționat totodată că valabilitatea legii liniare a filtrației nu determină limite nete între curgerea laminară și cea turbulentă în medii poroase. Legea liniară a filtrației poate să fie valabilă în domeniul curgerii laminare și chiar turbulente, dar legea neliniară de filtrare e sigur valabilă în regimul turbulent.

2) Valabilitatea legii lui Darcy pentru curgerea gazelor. În acest caz intervine și variația masei specifice încât se

ajunge astfel, la $\frac{\rho\Delta P}{\Delta S}$ sau, când legea Boyle-Mariotte este valabilă $\rho = \rho_0 P$ și deci:

$$\frac{\Delta P^2}{\Delta S} = a(\rho v) + b(\rho v)^2 \quad (41)$$

sau, după alți autori

$$\frac{\Delta P^2}{\Delta S} = a(\rho v) + b(\rho v)^n \quad (42)$$

Din experiențele făcute într-un mediu poros format din sfere de sticlă cu diametru uniform (0,063 cm) s-a obținut o variație liniară pentru o valoare $Re = 12$.

3) Concluzie asupra valabilității legii lui Darcy pentru curgerea gazelor și a lichidelor. Din încercările și din experiențele făcute pînă în prezent, se poate admite ca limite sigure ale domeniului de valabilitate a legii lui Darcy, domeniul unde Re are valori cuprinse între 0 și 1.

Cazurile practice de curgere în zăcămint se pot încadra în aceste limite ale cifrei lui Reynolds datorită vitezelor mici de curgere prin mediu poros.

d) *Legi de filtrare empirice, neliniare.* Atît timp cît vitezele sînt mici (sub cele critice) valoarea lui Re este mică și curgerea are loc conform legii liniare a filtrației.

La majoritatea sondelor (datorită coloanelor perforate), în apropierea găurii de sondă vitezele sînt foarte mari, depășind vitezele critice. În cazul legilor neliniare de filtrare s-au propus diferite formule empirice, de forma

$$v = c \left(\frac{dp}{de} \right)^{1/n} \quad (43)$$

în care c — constantă, iar $1 < n < 2$.

a) Pentru filtrarea apelor în roci fisurate, Krasnopolski propune formula:

$$v = k_K \sqrt{i} = k_K \left(\frac{dp}{de} \right)^{\frac{1}{2}}$$

în care v este viteza de filtrare, în cm/s, i — panta hidrolică, și k_K coeficientul lui Krasnopolski.

Experimental, coeficientul k_K se poate determina prin înlocuirea în ecuație (43) a datelor măsurate. Curgerea după ecuația (43) datorită relației între viteza v și dp este considerată prin analogie cu curgerea în conducte, o curgere turbulentă.

b) Pentru filtrarea în roci grosolane, Puzirevski a propus formula:

$$v = 35 \sqrt{i} \quad (44)$$

c) Pentru roci cu particule mari, s-a propus o altă ecuație;

$$v = 173 \left(\frac{d}{90} i \right)^n \quad (45)$$

în care:

- v este viteza de filtrare, în cm/s;
 d — diametrul particulelor componente ale roci, în cm;
 i — panta hidrolică;

$$n \text{ fiind egal cu } \frac{0,8 + d}{0,8 + 2d} < 1.$$

d) Pe baza datelor de producție se obține viteza de filtrație:

$$v = k_s \cdot i^n \quad (46)$$

în care k_s este un coeficient ale cărui valori se determină din date de producție, iar i — panta hidrolică, $n = 2/3$.

e) Constanta din legea lui Darcy. Din formularea generală analitică a legii lui Darcy, ecuația (22) rezultă că între viteza liniară de curgere într-un canal și gradientul de presiune, există o constantă de proporționalitate:

$$v = \text{const} \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (47)$$

sau,

$$v = \text{const} \frac{d^2}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (48)$$

în care

- d este diametrul efectiv al grăunțelor de nisip și
 μ — viscozitatea fluidului.

Tabela 5. Subunități a unui Darcy

Darcy (D)	Decidarey (dD)	Centidarey (cD)	Milidarey (mD)	Microdarey (μD)
1	10	100	1 000	1 000 000
0,1	1	10	100	100 000
0,01	0,1	1	10	10 000
0,001	0,01	0,1	1	1 000

Constanta din ecuația (48) corespunde caracteristicilor mediului poros, formeii grăunțelor, distribuției granulare a materialului de cimentare etc. Cercetările pentru corecta cunoaștere a acestor particule sînt dificile și neconcludente pentru orice mediu poros.

În vederea obținerii unor rezultate cu caracter general macroscopic, se contopește constanta cu d^2 , sub simbolul k , care să cuprindă astfel, într-o singură constantă, caracteristica întregului mediu poros.

Valoarea k este numită permeabilitate absolută, constantă hidrolică sau coeficient de permeabilitate absolută, și se măsoară cu $[L^2]$.

Legea lui Darcy scrisă în formă diferențială și vectorială este, respectiv

$$v_x = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \text{ și} \quad (49)$$

$$v = \frac{k}{\mu} \text{ grad } P = \frac{k}{\mu} \cdot \nabla P \quad (49')$$

de unde, coeficientul de permeabilitate absolută se definește ca fiind volumul unui fluid de viscozitate egală cu unitatea, care curge prin unitatea de secțiune a unui mediu poros, în unitatea de timp, sub acțiunea unui gradient cu presiunea egală cu unitatea.

Această constantă este determinată numai de structura mediului poros și este independentă de natura fluidului *).

Dimensiunile acestei constante sînt ale unei suprafețe:

$$\left[k \right] = \left[\frac{v \mu \, dx}{dp} \right] = \left[\frac{LT^{-1} \cdot F \cdot TL^{-2} \cdot L}{F \cdot L^{-2}} \right] = [L^2].$$

Constanta k este considerată ca o unitate, 1 darcy, cînd volumul este exprimat în cm^3 , lungimea în cm, timpul în s, presiunea în at fizice și viscozitatea în centipoise;

$$\text{astfel, } k = 1 \text{ darcy} \sim 1 (\text{cm}^3/\text{s})/\text{cm}^2/(\text{at}/\text{cm}).$$

Deoarece permeabilitatea rocilor colectoare de hidrocarburi variază între 5—0,0005 darcy s-au creat pentru motive practice, subdiviziunile indicate în tabela 5.

3. Ecuațiile hidrodinamice generale folosite la curgerea fluidelor omogene prin medii poroase. a) Ecuația continuității. Pentru a trata analitic problemele de curgere prin medii poroase, este folosită legea continuității formulată astfel: într-o curgere în unitate de timp, excesul de masă ce intră sau iese dintr-un volum elementar de fluid este egal cu variația în unitatea de timp a masei specifice a fluidului din volumul elementar considerat.

$$\begin{aligned} \text{div}(\rho \bar{v}) &= \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = m \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad ** \end{aligned} \quad (50)$$

Această ecuație a continuității, exprimă legea conservării materiei și este regăsită într-o formă asemănătoare în fizică, exprimînd același lucru în diferite domenii.

Cînd curgerea este staționară, deci independentă de timp, ecuația devine:

$$\begin{aligned} \text{div}(\rho \bar{v}) &= \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0. \end{aligned} \quad (51)$$

Pentru un fluid incompresibil, această ecuație ia forma:

$$\begin{aligned} \text{div}(\bar{v}) &= \frac{\partial}{\partial x}(v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(v_y) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z}(v_z) = 0 \end{aligned} \quad (52)$$

*) Cu excepția fenomenelor de alunecare.

**) În ecuația 50 prozitatea apare deoarece viteza reală de filtrare, e înlocuită prin relația (15)

b) *Ecuatia de forță*. Se consideră că asupra unui volum elementar de fluid acționează trei feluri de forțe (v. cap. V, Hidraulica generală).

1. Gradientii de presiune $\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z}$.

2. Forțele legate de masă ca gravitatea, cu componentele axiale f_x, f_y, f_z .

3. Forțe care se opun mișcării și care se datoresc frecării interioare.

Aceste forțe de frecare, pentru fluide cu viscozitate, sînt reprezentate prin componentele după cele trei axe X, Y, și Z:

$$\begin{aligned} \mu \nabla^2 v_x + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial \theta}{\partial x}; \mu \nabla^2 v_y + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial \theta}{\partial y}; \\ \mu \nabla^2 v_z + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial \theta}{\partial z} \end{aligned} \quad (53)$$

în care, ∇^2 este operatorul lui Laplace

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

θ o funcție ce exprimă ecuația continuității pentru fluide incompresibile

$$\theta = \operatorname{div} \bar{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

și μ este coeficientul de viscozitate al fluidului.

Scrind egalitatea celor trei forțe ce acționează asupra fluidului cu forța de inerție (produsul dintre masa ρ și accelerația $\frac{dv}{dt}$) rezultă pentru fiecare dintre axe, ecuațiile lui Navier-Stokes, de forma:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dv_x}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + f_x + \mu \nabla^2 v_x + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \\ \rho \frac{dv_y}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + f_y + \mu \nabla^2 v_y + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \\ \rho \frac{dv_z}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + f_z + \mu \nabla^2 v_z + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial \theta}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

Aceste ecuații se pot rezolva foarte greu și, în general, numai pentru anumite condiții. Dat fiind că în studiul curgerii prin medii poroase, curgerea nu are loc în canale cu o secțiune constantă, ci în canale neregulate și cu forme variate, aceste ecuații nu pot fi folosite, întrucît ele ar necesita un studiu microscopic al curgerii.

c) *Forma generalizată a legii lui Darcy*. Ecuația continuității este reținută, dar ecuațiile lui Navier-Stokes sînt înlocuite cu o analiză microscopică a mediului poros și în acest sens s-a pornit de la experiențele lui Darcy pentru curgerea lichidelor, iar mai recent de la experiențele în legătură cu curgerea gazelor prin medii poroase.

Legea lui Darcy se aplică întregului mediu poros (avînd astfel un caracter statistic) întrucît

echivalează cu un număr mare de rezultate ale ecuațiilor lui Navier-Stokes, aplicate în parte pentru un număr mare de pori.

În acest sens se presupune că, în curgerea tridimensională, rezultanta vitezei în orice punct este direct proporțională în mărime și direcție cu gradientul de presiune în acel punct.

1. Dacă se presupune că vitezele se pot descompune după axele de coordonate, se obține, luînd semnul minus, pentru sensul în care are loc scăderea presiunii:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \\ v_y &= -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \\ v_z &= -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (55)$$

în care μ este viscozitatea absolută a fluidului și k — permeabilitatea. În general, k variază după fiecare axă, dar dacă mediul poros este izotrop, permeabilitatea este independentă de direcție.

2. În cazul cînd o forță din afară, cu componentele X, Y, Z acționează asupra unității de volum a unui fluid, această forță influențează asupra vitezei ca și gradientul, de presiune și în acest caz, legea lui Darcy are forma:

$$v_x = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + X \right) \quad (56)$$

$$v_y = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} + Y \right) \quad (57)$$

$$v_z = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + Z \right) \quad (58)$$

3. Presupunînd că forțele acestea provin dintr-un potențial Q , se poate introduce o funcție Φ , în care

$$\Phi = \frac{k}{\mu} (p + Q) \quad (59)$$

rezultînd

$$\left. \begin{aligned} v_x &= -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \\ v_y &= -\frac{\partial \Phi}{\partial y} \\ v_z &= -\frac{\partial \Phi}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (60)$$

sau în formă vectorială:

$$\bar{v} = -\nabla \Phi \quad (61)$$

Ecuațiile (59) și (61) sînt considerate ca o generalizare a legii lui Darcy și în același timp sînt considerate ca ecuații de bază pentru curgerea fluidelor viscoase și omogene, prin medii poroase.

Analizând ecuația (59) rezultă că Φ depinde de viscozitatea μ și că această ecuație este independentă de ρ .

Ecuațiile generalizate ale lui Darcy (60) se caracterizează prin faptul că ele nu cuprind masa specifică ρ a fluidului. În ecuațiile lui Navier-Stokes, masa specifică ρ intră în expresia forței de inerție. Întrucât ρ nu există în ecuația lui Darcy, aceasta înseamnă că, practic, forța de inerție este neglijabilă la curgerea lichidelor prin medii poroase. Acest lucru corespunde realității întrucât, în comparație cu frecarea foarte mare, care există, forțele de inerție nu mai sunt luate în considerație.

4. Cuplind ecuațiile (62) cu ecuația continuității (50) se obține:

$$\operatorname{div}(\rho \nabla \Phi) = \nabla \left[\rho \nabla \cdot \frac{k}{\mu} (p + G) \right] = m \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (62)$$

5. Considerând permeabilitatea k și viscozitatea μ independente de presiune și de mediul poros, deci ca niște constante absolute, ecuația devine:

$$\nabla \left[\rho \nabla (p + G) \right] = \frac{m \mu}{k} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (63)$$

unde m este porozitatea.

Această ecuație (63) este ecuația generală de curgere valabilă pentru orice mediu poros cu condiția ca acest mediu să fie omogen și izotrop, iar viscozitatea să nu fie influențată de presiune.

Afară de aceste două ecuații caracteristice ale curgerii prin medii poroase, mai este necesară caracterizarea termodinamică a curgerii.

d) Caracterizarea termodinamică a curgerii. Din experiențele făcute, s-a constatat că aproape pentru toate fluidele omogene și cu frecare interioară, care prezintă un interes practic, se poate folosi cu suficient succes următoarea formă generală a ecuației de stare:

$$\rho = \rho_0 p^{b_0} e^{\beta p} \quad (64)$$

în care ρ_0 este masa specifică în condiții inițiale.

- ρ — masa specifică;
- p — presiunea fluidului;
- b — un coeficient ce caracterizează starea fluidului lichidă sau gazoasă;
- β — o constantă caracteristică fluidului (coeficient de compresibilitate în cazul $n = 0$, al lichidelor).

În cazul lichidelor $\left\{ \begin{array}{l} b=0 \\ \beta=0, \text{ pentru lichide incompresibile} \\ \beta \neq 0, \text{ pentru lichide compresibile} \end{array} \right.$

În cazul gazelor $\left\{ \begin{array}{l} b_0=1, \text{ pentru o expansiune izotermă} \\ b_0=\text{exponentul transformării izotrope, în particular} \\ b_0=\frac{C_p}{C_v}=\text{exponentul adiabatic.} \end{array} \right.$

Dacă se admite că G este potențialul singurei forțe exterioare care acționează asupra fluidului (reprezentînd gravitatea) și că:

$$G = \rho g z, \quad (65)$$

se găsește, pe baza ecuației (62) pentru lichide incompresibile ($\rho = \rho_0$) ecuația de forma:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 = \Delta \Phi \quad (66)$$

iar pentru lichide compresibile, ecuația:

$$\begin{aligned} \nabla \left[\left(\frac{1}{\beta} + \rho g z \right) \nabla \rho + \rho^2 g \nabla z \right] = \\ = \frac{m \cdot \mu}{k} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \quad (67)$$

Deoarece pentru un lichid obișnuit β este de ordinul 10^{-4} /at și $\rho g = \gamma$ are o valoare de ordinul 10^{-3} kg/cm³ termenii înmulțiți cu ρ se pot neglija complet față de $1/\beta$.

Dacă curgerea are loc pe un plan orizontal, componenta gravitației nu are un rol prea important pentru curgere, și termenul $\rho g \nabla z$ se poate neglija, obținîndu-se în locul ecuației (67):

$$\nabla^2 \rho = \frac{m \beta \mu}{k} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \quad (68)$$

În cazul gazelor se ține seama că $\rho = \rho_0 p^{b_0}$ și ecuația (68) devine

$$\begin{aligned} \nabla^2 \rho &= \frac{1+b_0}{b_0} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{1+b_0}{b_0} \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} + \frac{1+b_0}{b_0} \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} = \\ &= \frac{(1+b_0) f \mu \rho_0}{k} \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \quad (69)$$

Ecuația (66) care se referă la lichide incompresibile este, după cum se vede independentă de timp și curgerea în acest caz este guvernată de ecuația lui Laplace.

Ecuația fundamentală pentru lichidele compresibile (68) este identică cu ecuația lui Fourier pentru transmisia căldurii.

Ecuația (68) în cazul unei stări staționare are aceeași formă cu ecuația (66), în care masa specifică ρ , joacă rolul presiunii p sau a potențialului de viteză Φ (curgerea staționară a lichidelor compresibile fiind guvernată tot de ecuația lui Laplace).

Ecuația (69) reprezintă ecuația de curgere a gazelor pentru cazul nestaționar, iar în cazul cînd termenul din dreapta este egal cu zero se obține ecuația de curgere staționară a gazelor prin mediul poros.

4. Condiții inițiale și condiții de limită. Ecuațiile (66) (67) (68) și (69) pot oferi o

infinite de soluții, încât pentru rezolvarea unui caz particular soluția trebuie căutată în adaptarea acestor ecuații la cazul respectiv.

În primul rând se alege din ecuațiile (66) (67) (68) și (69), ecuația corespunzătoare fluidului respectiv (compresibil, incompresibil, gaz, lichid) care urmează a fi rezolvată.

Limitele regiunii în care urmează a se cerceta problema sînt încadrate într-o suprafață geometrică, în care:

— se cunosc în toate punctele fie viteza fluidului, fie potențialul de viteză, fie o funcție a amîndurora;

— se urmărește aflarea vitezei și a distribuției potențialului în interiorul suprafeții geometrice, cunoscîndu-se condițiile de curgere la limita suprafeței; (cunoscînd, spre exemplu, condițiile la suprafața unei sfere, se poate determina distribuția vitezei și a potențialului în interiorul acesteia etc.).

În cazul unei curgeri staționare a unui fluid incompresibil, folosind ecuația (68) este suficientă cunoașterea condițiilor la limită (la limitele conturului geometric înăuntru cărora se află suprafața ce interesează), pentru a putea determina distribuția vitezei și a potențialului.

În cazul curgerilor nestaționare unde ρ variază cu timpul, trebuie cunoscute și condițiile inițiale (valoarea inițială a lui ρ la începutul curgerii).

Distribuția vitezei și a potențialului în cazul curgerii nestaționare este diferită (la aceleași condiții limită) în cazul cînd condițiile inițiale au fost deosebite. Pe de altă parte, în cazul unor condiții limită ce variază foarte încet cu timpul fenomenul nestaționar tinde spre un fenomen staționar.

Pe aceste considerente, se vede că în mediul poros, curgerea unui fluid este definită prin:

a) stabilirea limitelor geometrice ale regiunii în care se urmărește obținerea unei soluții convenabile;

b) valoarea condițiilor limită ce trebuie să satisfacă conturul regiunii, și

c) cunoașterea masei specifice în condițiile inițiale.

Notînd cu S conturul și variabilele dependente p , Φ , sau ρ , condițiile limită pot lua forma:

Φ este dat pe conturul S , sau

$\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ — dat pe conturul S , (n este normala pe suprafața S) sau

$\frac{\partial \Phi}{\partial n} + h$ — dat pe conturul S [h poate fi o funcție de (X, Y, Z)].

Problema se reduce deci la găsirea unei funcții $\Phi(X, Y, Z)$, care să satisfacă ecuațiile (66), (67), (68) sau (69). Funcția Φ va depinde de natura fluidului, de condițiile limite și de condițiile inițiale (dacă este cazul unei curgeri nestaționare).

C. CURGEREA FLUIDELOR ETEROGENE PRIN MEDII POROASE

a. Noțiuni generale

Curgerea fluidelor omogene printr-un mediu poros, are loc în cazul zăcămintelor de țitei, în general cînd țiteiul este subsaturat cu gaze, sau (ceea ce revine la același lucru) cînd presiunea fiind mai mare ca presiunea de saturație, toate gazele se află dizolvate în țitei.

Curgerea simultană a mai multor faze în mediul poros poate avea loc:

1. Curgerea gaz-țitei — are loc cînd presiunea zăcămintului fiind sub presiunea de saturație, gazele ies din soluție și curg împreună cu țiteiul (Exploatare sub energia expansiunii gazelor eșite din soluție).

2. Curgerea apă-țitei: a) are loc cînd țiteiul este împins de o apă de sinclinal alimentată, continuu;

b) are loc cînd țiteiul înaintază spre sondă datorită energiei de destindere elastică a apei de sinclinal;

c) are loc cînd țiteiul este împins de apă injectată în strat. Aceasta se întîmplă: 1) în cazul menținerii presiunii prin injectare de apă, 2) în cazul spălării cu apă la recuperare secundară.

În cazurile enumerate mai sus la 2.c) 2), faza gazoasă există și ea, căci în cazul recuperării secundare, gazele au ieșit din soluție, dar în restul cazurilor enumerate presiunea este mai mare decît presiunea de saturație, și nu poate fi vorba decît de țitei cu gaze dizolvate.

3. Curgerea apă-gaz — are loc în cazul cînd zăcămintelor de gaze, în care gazele sînt împinse sub energia de destindere a apei de sinclinal.

În cazul curgerii mai multor faze în mediul poros, trebuie reexaminată noțiunea de permeabilitate. Astfel există următoarele noțiuni de permeabilitate:

— permeabilitate absolută — este valoarea permeabilității oferită de mediul poros la curgerea unei singure faze (curgere omogenă). Se notează cu litera k și se măsoară în darcy;

— permeabilitate efectivă — este permeabilitatea ce o oferă mediul poros pentru o fază, ținînd seama că această curgere are loc în prezența altei faze. Permeabilitățile efective pentru apă, țitei și gaze se notează respectiv k_a , k_t , și k_g și fiecare se măsoară în darcy;

— permeabilitate relativă este raportul dintre permeabilitatea efectivă și cea absolută și de aceea reprezintă o valoare adimensională. De exemplu: H_g, H_t, H_a , (v. Cap. V. F. a).

Se observă că permeabilitatea absolută k este o caracteristică a mediului poros, independentă*) de interacțiunea ce apare între acesta și fluid, pe cînd permeabilitatea efectivă este

*) în primă aproximație; v. și alterarea permeabilității prin influența hidrării și adsorbției substanțelor superficiale active. Cap. VI A.b. 2 și 3.

diferită de la un fluid la altul și de la un mediu poros la altul.

b. Experiențe și concluzii

1. Una dintre instalațiile experimentale cu care s-au făcut încercările, reprezentată în fig. 8, era constituită dintr-un tub 1 de bachelită de diametru 2" lung de 3 m, care reprezenta stratul. Acest tub era compus din 10 secțiuni 2, iar prinderea lor s-a făcut cu inele de bronz, care erau în același timp și inele piezometrice și electrozi. Legătura la fiecare manometru se face ca în schița de detaliu c, iar înregistrarea conductibilității electrice conform cu schema instalației electrice 3.

Cele două fluide cu care s-a experimentat au fost apa și anhidrida carbonică, introduse prin a și măsurate la ieșire în d, iar viscozitatea și conductibilitatea apei au fost mărite, după necesități, prin adăugarea unor substanțe chimice.

Trasind o curbă de calibrare conductibilitate-saturație *) și apoi experimentind, se măsoară cu instalația 3, conductibilitatea electrică în fiecare secțiune. Din comparația cu curba de conductibilitate-saturație, se determină volumul de fază gazoasă și de fază lichidă.

2. Concluzii experimentale.

Datele experimentale au arătat că:

a) Dacă saturația în lichid este inferioară unei anumite valori (de ordinul a 27 % în nisipuri și în calcare și de 50 % în gresii și nisipuri consolidate), permeabilitatea efectivă pentru faza lichidă a amestecului gaz-lichid este nulă $k_l = 0$.

Această înseamnă că în exploatarea zăcămintului sub energia gazelor libere (din zona de gaze libere) sau în cazul spălării cu gaze, întrucât $k_l = 0$, nu se poate extrage întreaga cantitate de țiței din zăcămint, rămânând în el o cantitate între 30–50 %.

De asemenea s-a constatat că mărirea rației de gaze în timpul exploatării, duce la o mărire a saturației cu gaze, ceea ce are ca urmare o scădere a permeabilității pentru țiței, respectiv o scădere a debitului de țiței.

b) În cazul curgerii a două faze lichide (apă-țiței) s-a constatat că pentru o saturație în țiței între 0 și cca 20 %, permeabilitatea pentru țiței este nulă. Ca o consecință, în cazul spălării cu apă, coeficientul de extracție maxim ce se poate atinge nu depășește 80 %.

Tot experimental s-a constatat că variația permeabilităților efective cu saturația, depinde într-o oarecare măsură de natura rocii. De asemenea s-a constatat că alura curbelor per-

meabilitate-saturație, este independentă de viscozitate.

c. Ecuațiile hidrodinamice ale fluidelor eterogene

1. Generalizarea ecuației lui Darcy. În cazul prezenței în strat a mai multor fluide, distribuția fazelor variază în timpul curgerii și, odată cu aceasta și permeabilitatea pentru fiecare dintre faze.

Permeabilitatea absolută unui mediu poros este constantă k , dar permeabilitățile efective k_a , k_g și k_t variază de la un punct la altul, în funcție de distribuția saturației, încît ecuația lui Darcy pentru fiecare fază devine:

$$\left. \begin{aligned} \bar{v}_a &= \frac{k_a}{\mu_a} \nabla (p - \rho_a g z) \\ \bar{v}_t &= \frac{k_t}{\mu_t} \nabla (p - \rho_t g z) \\ \bar{v}_g &= \frac{k_g}{\mu_g} \nabla (p - \rho_g g z) \end{aligned} \right\} \quad (70)$$

unde: a, t, g, sînt indicii pentru apă, pentru țiței și pentru gaze;

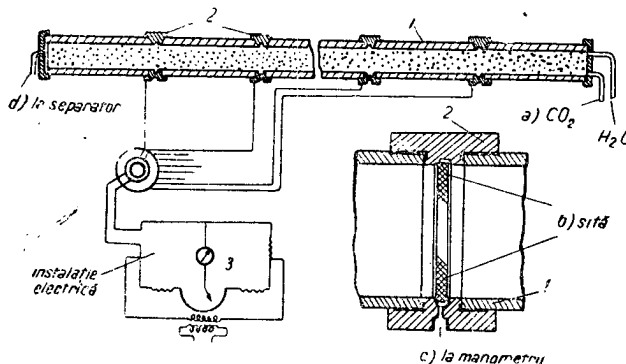


Fig. 8. Schema instalației experimentale pentru curgerea fluidelor eterogene prin mediul poros.

\bar{v} este vectorul vitezei;

k — permeabilitatea;

μ_a, μ_g, μ_t — viscozitatea apei, gazelor, respectiv țițeiului;

p — presiunea;

ρ — masa specifică;

g — accelerația gravitației.

Aceste ecuații generalizate ale lui Darcy pot fi utilizate numai dacă din relația permeabilitate-saturație sînt cunoscute valorile k_a , k_t și k_g care se introduc în ecuație.

2. Ecuațiile generale ale mișcării se obțin din ecuațiile lui Darcy generalizate (70) și din ecuațiile de continuitate.

*) v. fig. 28 din Cap. V.

Ecuatiile continuității pentru fiecare fază se cuplează cu ecuațiile (70) și se obțin respectiv ecuațiile generale de curgere.

Pentru gaze:

$$\begin{aligned} & \nabla \left[\frac{r_t k_t}{b_t \mu_t} \nabla (p - \rho_t g z) + \right. \\ & + \frac{r_a k_a}{b_a \mu_a} \nabla (p - \rho_a g z) + \\ & \left. + \frac{\rho_g k_g}{\mu_g} \nabla (p - \rho_g g z) \right] = \\ & = m \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_t r_t}{b_t} + \frac{S_a r_a}{b_a} + \rho_g S_g \right) \end{aligned} \quad (71)$$

Pentru țitei:

$$\nabla \left[\frac{k_t}{b_t \mu_t} \nabla (p - \rho_t g z) \right] = m \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_t}{b_t} \right) \quad (71')$$

Pentru apă:

$$\nabla \left[\frac{k_a}{b_a \mu_a} \nabla (p - \rho_a g z) \right] = m \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_a}{b_a} \right) \quad (71'')$$

unde:

t.a.g. sînt indicii pentru fazele de țitei apă și gaz;

r — volumul de gaz dizolvat în volumul de lichid corespunzător indicelui a, t, respectiv în condiții standard;

k — permeabilitatea efectivă față de fluidul corespunzător indicelui respectiv;

b — coeficientul de volum al fazei lichide;

μ — viscozitatea;

ρ — masa specifică;

p — presiunea;

m — porozitatea;

t — timpul;

S — saturația în fiecare fază, crespunzătoare indicelui, ca o fracțiune a volumului de pori.

În aceste ecuații valorile r, b, μ , ρ sînt considerate ca funcții de presiune, iar permeabilitățile relative ca o funcție de saturație S (după relația permeabilitate-saturație), în diagramele din capitolul « Fizica zăcămintului ».

Observații asupra ecuațiilor (71):

a) În majoritatea zăcămintelor, solubilitatea gazelor în apă S_a poate fi neglijată față de cea în țitei, deoarece rațiile de soluție sînt foarte reduse $r_a \ll r_t$.

b) Ecuatiile (71) sînt atît de dificil de integrat încît obținerea soluțiilor acestor ecuații, în cazul unei probleme nestaționare este practic imposibilă.

La proiectarea zăcămintelor petrolifere, tratarea fluidelor ca omogene nu poate da decît un aspect calitativ al problemei respective.

În această lumină trebuie urmărite de asemenea toate problemele de recuperare secundară prin spălarea straturilor cu apă și cu gaze legate de obținerea unui coeficient de extracție

cît mai mare (faptul că existența unei alte faze gaz sau apă) în zăcămint dă roci colectoare o permeabilitate efectivă pentru țitei mai mică decît cea absolută și împiedică o extracție de 100 % a țiteiului).

D. ANALIZA CURGERII FLUIDELOR OMOGENE ȘI INCOMPRESIBILE

Curgerea prin mediu poros poate fi analizată după natura acesteia, astfel:

Curgerea unidimensională (liniară) este cea curgere în care liniile de curent sînt paralele, iar vectorii viteze sînt egali în orice secțiune normală a curgerii, astfel încît studiul hidrodinamic poate fi făcut de-a lungul unei singure linii de curent.

Curgerea bidimensională plană este curgere în care mișcarea particulelor unui fluid se face paralel cu un plan: (în orice punct al curgerii, vectorii viteze sînt paraleli cu un plan comun de referință). Pentru studiul curgerii, problema se reduce, în acest caz, la studiul mișcării într-un plan paralel cu planul de referință.

Dacă în aceste plane liniile de curent sînt drepte care converg către un punct sau diverg dintr-un punct, o astfel de mișcare se numește curgere radială plană.

Curgerea tridimensională este cea curgere în care, în general, nu există nici egalitate de modul nici paralelism al vectorilor viteze, între ei sau cu un element geometric de referință, fiind necesare trei coordonate pentru determinarea punctelor unei linii de curgere.

Dacă liniile de curent într-o curgere tridimensională sînt drepte, care converg către un punct sau diverg dintr-un punct, o astfel de mișcare se numește curgere radială sferică.

a. Curgerea fluidelor omogene, și incompresibile care respectă legea liniară a filtrației (Legea lui Darcy)

1. Curgerea unidimensională printr-un mediu poros a unui fluid omogen și incompresibil. În cazul unui fluid care se mișcă

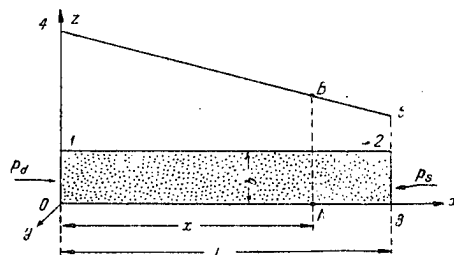


Fig. 9. Secțiune verticală printr-un strat în cazul curgerii unidimensionale.

de-a lungul axei ox se analizează numai o linie de curgere, pentru că ceea ce este valabil pentru o linie, este valabil pentru toate liniile de curgere.

Se consideră un mediu poros (fig. 9) de lungime L și lățime b iar la conturul de alimentare $o-1$ lucrează presiunea p_d (exercitată de o apă activă). Pe linia $2-3$ se presupune un grup de sonde infinit de apropiate (practic o galerie), unde presiunea este p_s .

Egalind vitezele din ecuația continuității:

$$v = \frac{Q}{F}$$

cu viteza din ecuația lui Darcy (49)

$$v = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}$$

se obține:

$$dp = -\frac{Q\mu}{Fk} \cdot dx. \quad (72)$$

Integrând ecuația (72) și anume presiunea între p_d și p_s și distanța între o și L , se obține

$$Q = F \frac{k}{\mu} \cdot \frac{p_d - p_s}{L} \quad (73)$$

în care F este suprafața mediului poros, perpendiculară pe direcția de curgere:

$$F = b \times h \quad (74)$$

unde h este grosimea stratului, și b lățimea acestuia.

Distribuția presiunii este dată prin integrarea ecuației (72):

$$p = p_d - \frac{p_d - p_s}{L} x \quad (75)$$

în care p este presiunea corespunzătoare unei distanțe x de la conturul de alimentare.

Viteza de curgere este dată de relația:

$$v = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{p_d - p_s}{L} \quad (76)$$

Se observă că variația presiunii din ecuația (75) este liniară, așa cum apare în figura (9) linia $4-5$, iar izobarele sînt niște linii drepte, perpendiculare pe direcția curgerii.

Pe de altă parte, din ecuația (76) se vede că viteza rămîne constantă pe tot parcursul curgerii de la conturul de alimentare la gaura de sondă; iar liniile de curgere vor fi drepte paralele cu liniile $1-2$ și $o-3$.

Timpul t al deplasării unei particule de fluid se calculează din relația:

$$v = m \cdot v_1 = m \frac{dx}{dt} \quad (77)$$

în care v_1 este viteza reală și m porozitatea.

Introducînd în ecuația (77) valoarea vitezei v din ecuația (76) se obține prin integrare timpul t :

$$t = \frac{m \mu L}{k(p_d - p_s)} x + t_0 \quad (78)$$

de unde se vede că timpul variază liniar cu parcursul.

2. Curgerea plană a fluidelor omogene și incompresibile. Curgerea fiind plană și lichidele incompresibile, potențialul de viteză satisface ecuația lui Laplace, care în coordonate carteziene este

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (79)$$

$$\text{unde:} \quad \Phi = \frac{k}{\mu} (p + \rho g z). \quad (80)$$

Pe baza relației (80), ecuația (79) se poate scrie sub forma:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0.$$

Componentele vitezei v vor fi:

$$v_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (81)$$

și

$$v_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \quad (82)$$

a) *Curgerea radială plană simetrică spre o sondă.* Pentru tratarea în plan a acestei probleme, se presupune o curgere simetrică față de axa găurii de sondă a fluidului către gaura de sondă.

Condițiile de simetrie ale curgerii sînt următoarele:

- presiunea este uniform distribuită pe conturul de alimentare;
- conturul de alimentare este circular;
- sonda este concentrică cu conturul de alimentare.

Pe de altă parte, fluidul este considerat incompresibil, grosimea stratului uniformă, iar mediul poros ca fiind izotrop.

Folosind ecuația lui Laplace în coordonate cilindrice (4), în planul $r\theta$ se poate scrie:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} = 0 \quad (83)$$

iar vitezele sînt:

$$v_r = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \quad \text{și} \quad v_\theta = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial \theta} \quad (84)$$

În cazul curgerii radiale simetrice ecuațiile (85) și (86) devin:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 0 \quad (85)$$

$$v_r = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \quad \text{și} \quad v_\theta = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial \theta} = 0. \quad (86)$$

Intregind ecuația (85) rezultă succesiv

$$r \frac{\partial p}{\partial r} = \text{const} = c_1$$

$$p = c_1 \ln r + c_2. \quad (87)$$

Introducând condițiile limită (figura 10),

la $r = r_s$ corespunde $p = p_s$

la $r = r_d$ corespunde $p = p_d$

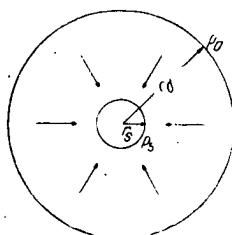


Fig. 10. Secțiune orizontală printr-un strat în cazul unei curgeri radial-plane.

(în care indicele s reprezintă conturul sondei și d conturul de alimentare) din ecuația (87), se obține:

$$\begin{aligned} p_s &= c_1 \ln r_s + c_2 \\ p_d &= c_1 \ln r_d + c_2 \end{aligned} \quad (88)$$

în care:

$$c_1 = \frac{p_d - p_s}{\ln r_d / r_s} \quad \text{și} \quad c_2 = \frac{p_s \ln r_d - p_d \ln r_s}{\ln r_d / r_s} \quad (89)$$

De aici rezultă că presiunea p corespunzătoare unei distanțe r de la centrul conturului de alimentare este:

$$\begin{aligned} p &= p_s + \frac{p_d - p_s}{\ln r_d / r_s} \cdot \ln r / r_s \\ p &= p_d - \frac{p_d - p_s}{\ln r_d / r_s} \cdot \ln r_d / r \end{aligned} \quad (90)$$

Distribuția vitezei se determină plecând de la ecuația lui Darcy

$$v = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{k}{\mu} \frac{p_d - p_s}{\ln r_d / r_s} \cdot \frac{1}{r} \quad (91)$$

Debitul Q se obține prin integrarea suprafeței $hrd\theta$ înmulțită cu viteza din ecuația (91)

$$Q = -\int_0^{2\pi} v h r d\theta = \frac{2\pi k h (p_d - p_s)}{\mu \ln r_d / r_s} \quad (92)$$

Prin ecuațiile (90) și (91) s-a calculat pentru cazul unui contur de alimentare de rază $r_d = 150$ m în centrul căruia este săpată o sondă de rază, $r_s = 7,5$ cm, o presiune $p_s = 0$ at și $p_d = 10$ at, variația distribuției presiunii și vitezei. Valorile obținute au fost trasate în diagrama fig. (11) din care se vede că presiunea scade de la contur spre gaura de sondă, în timp ce viteza fluidului crește. De asemenea observă că atît scăderile presiunii, cît și creșterile vitezei au valori importante în imediata apropiere a găurii de sondă.

Ținînd seama că presiunile p_d și p_s pot fi echivalate cu coloane de fluid de înălțime h_1 și h_2 pentru un țitei de greutate specifică γ ,

$$p_d = \gamma h_1$$

$$p_s = \gamma h_2$$

ecuația (92) poate fi scrisă sub forma

$$Q = \frac{2\pi k \gamma S}{\mu \ln r_d / r_s} \quad (93)$$

unde $\gamma S = \gamma (h_1 - h_2)$.

Întrebuintînd sistemul mixt de unități (tabela 1) se obține debitul în cm^3/s , introducînd k în darcy, μ în cP, h în cm, Δp în at.

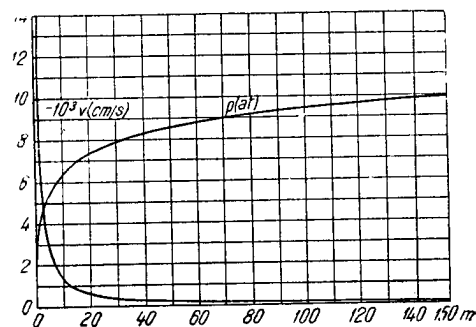


Fig. 11. Distribuția presiunii și a vitezei în cazul unei sonde perfecte hidrodinamice, cînd are loc o curgere radial-plană a unui fluid omogen și incompresibil. $k = 1$; $r_d = 150$ m; $r_s = 7,5$ cm; $p_d = 10$ at și $p_s = 0$.

Pentru debitele exprimate în $\text{m}^3/24$ ore se ia grosimea h a straturului în m și logaritmi zecimali, ecuația (92) devenind:

$$Q = 23,6 \frac{k h \Delta p}{\mu \log r_d / r_s} \quad (94)$$

Considerînd constante caracteristicile fizice k , μ și caracteristicile geometrice h , r_d și r_s , variația debitului Q cu diferența de presiune Δp este liniară, ca în fig. 12.

Timpul necesar deplasării unei particule între o distanță r_0 și o distanță r de la centrul găurii de sondă se obține plecînd de la ecuația (15):

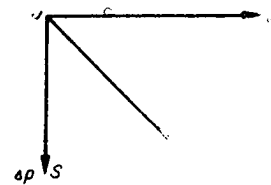


Fig. 12. Reprezentarea grafică a variației $a - \Delta p$ în cazul unei curgeri radial-plane în cazul valabilității legii lui Darcy.

$$v = m \cdot v_1 = m \frac{dr}{dt} \quad (95)$$

în care v este înlocuit din ecuația (91) și de unde rezultă prin integrare

$$\begin{aligned} t &= \frac{m \mu \ln r_d / r_s}{2 k (p_d - p_s)} (r_0^2 - r^2) = \\ &= \frac{\pi h m}{Q} (r_0^2 - r^2). \end{aligned} \quad (96)$$

Timpu total T necesar deplasării particulelor de la distanța r_0 la gaura de sondă de raza r_s , se obține din ecuația (96) în care s-a înlocuit r prin r_s (care este practic neglijabil față de r_0) încît

$$T \approx \frac{m\mu \ln r_d / r_s}{2k(p_d - p_s)} r_0^2 = \frac{\pi h m}{Q} r_0^2. \quad (97)$$

b) *Observații asupra relațiilor curgerii radiale plane simetrice.* Din relațiile (93) și din fig. (11) rezultă că viteza scade hiperbolic cu raza.

Astfel, viteza va tinde către valori foarte mici la limita conturului de alimentare și va fi maximă, cînd raza r se confundă cu raza sondei.

Din relațiile (90) și din fig. (11) rezultă că presiunea p , într-un punct situat la o distanță r de axa sondei, variază logaritmîc cu r și că presiunea este aceeași pe întreg conturul de rază $r = \text{const.}$

Izobarele vor fi deci, niște cercuri concentrice, iar razele, care sînt ortogonale pe aceste cercuri, vor reprezenta liniile de curent.

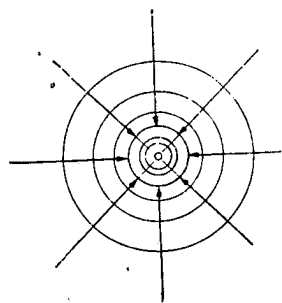


Fig. 13. Distribuția izobarelor într-o curgere radial-plană văzută într-o secțiune orizontală prin mediul poros.

Întrucît izobarele sînt trasate astfel încît între două izobare alăturate diferența de presiune să fie constantă, se observă din fig. 14 că scăderea presiunii este mică la o distanță mare de sondă și mare apropierea sondei.

În fig. 14 s-au considerat nivelul static 1-5-6-2 și nivelul 3-4, corespunzător pre-

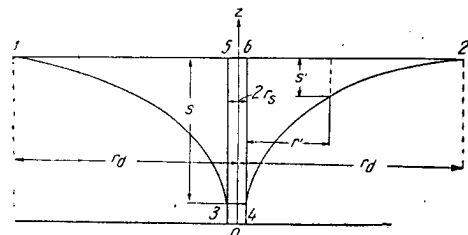


Fig. 14. Curbe piezometrice,

siunii statice p_d și presiunii de la fundul sondei p_s .

Curbele logaritmice 1-3 și 2-4 care reprezintă variația presiunilor în funcție de raza r' de la axa sondei se numesc curbe piezometrice; rotindu-le în jurul axei oz se obține pîlnia de depresiune piezometrică. La o distanță r' nivelul

piezometric este s' , iar la gaura de sondă nivelul este s . Se poate astfel scrie relația:

$$\frac{s}{s'} = \frac{p_d - p_s}{p_d - p'} = \frac{\ln r_d / r_s}{\ln r_d / r}. \quad (98)$$

Din ecuația debitului (92) se poate vedea că datorită faptului că raportul razelor r_d / r_s intervine numai ca argument al unui logaritm, încît aceasta nu influențează prea mult asupra valorii.

Astfel, spre a mări de două ori debitul unei sonde prin modificarea razei sondei r_s , ar fi necesară o rază de sondă r'_s

$$r'_s = \sqrt{r_d \cdot r_s} \quad (99)$$

și în același fel se poate modifica raza r_d a conturului de alimentare într-o nouă rază (r'_d) modificată tot așa în același raport:

$$r'_d = \sqrt{r_d \cdot r_s}. \quad (100)$$

(Pentru o rază $r_s = 7,5$ cm și $r_d = 150$ m, debitul se dublează dacă $r'_s = 3,37$ m, ceea ce nu poate constitui în nici un caz o soluție tehnică a problemei de față).

Se vede totodată că aprecierea inexactă a valorii lui r_d nu modifică decît foarte puțin valoarea debitului.

3. *Curgerea tridimensională a unui fluid omogen și incompresibil printr-un mediu poros.* Pentru anumite cazuri (sonde care n-au străpuns în întregime stratul productiv sau au atins numai coperișul acestuia) trebuie luată în considerație și variația potențialului după axa z .

Potențialul este dat de funcția:

$$\Phi = \frac{k}{\mu} (p - \rho g z). \quad (101)$$

Curgerea sferică. La o curgere radial sferică ecuația lui Laplace în coordonate sferice (7) se reduce datorită simetriei radiale

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) = 0. \quad (102)$$

Integrînd ecuația (102) se obține potențialul Φ sub forma:

$$\Phi = -\frac{c_1}{r} + c_2 \quad (103)$$

în care c_1 și c_2 sînt constantele de integrare. Se observă în ecuația (103) că potențialul variază invers proporțional cu raza, spre deosebire de curgerea radial-plană unde potențialul variază logaritmîc cu raza.

În ecuația (103) se introduc următoarele condiții-limită:

la $r = r_s$ corespunde potențialul $\Phi = \Phi_s$
și la $r = r_d$ corespunde potențialul $\Phi = \Phi_d$
și se obține :

$$\Phi = \Phi_s + \frac{\Phi_d - \Phi_s}{\frac{1}{r_d} - \frac{1}{r_s}} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_s} \right) \quad (104)$$

$$\text{sau } \Phi = \Phi_d - \frac{\Phi_d - \Phi_s}{\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_d}} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_d} \right) \quad (105)$$

De aci viteză se obține prin derivarea potențialului:

$$\text{lui } \Phi: v = -\frac{\partial \Phi}{\partial r} = -\frac{\Phi_d - \Phi_s}{\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_d}} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (106)$$

Debitul rezultă din integrarea produsului dintre viteză v și elementul de suprafață sferică $r^2 \sin \theta d\theta \cdot d\varphi$

$$Q = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi r^2 \sin \theta v d\theta = \frac{4\pi (\Phi_d - \Phi_s)}{\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_d}} \quad (107)$$

Ținând seama că $r_d \gg r_s$ ecuațiile (104) și (105) se pot scrie pentru calculele practice (dacă $r \ll r_d$) sub forma:

$$\Phi = \Phi_s + (\Phi_d - \Phi_s) \left(\frac{r_s}{r} - 1 \right) \quad (108)$$

$$\Phi = \Phi_d - (\Phi_d - \Phi_s) \frac{r_s}{r} \quad (109)$$

În același fel și viteză din ecuația (106) devine

$$v = (\Phi_d - \Phi_s) r_s \times \frac{1}{r^2} \quad (109)$$

iar ecuația debitului (107), ținând seama că în cazul sondelor curgerea are loc numai pe o jumătate de sferă, devine

$$Q = 2\pi r_s (\Phi_d - \Phi_s) = 2\pi r_s \frac{k}{\eta} (p_d - p_s) \quad (110)$$

În funcție de debitul Q în loc de diferența de potențial $\Phi_d - \Phi_s$, ecuațiile distribuției potențialului și vitezei sînt:

$$\Phi = \Phi_d - \frac{Q}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_d} \right) \quad (111)$$

$$\Phi = \Phi_s + \frac{Q}{2\pi} \left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r} \right) \quad (112)$$

$$v = \frac{Q}{2\pi r^2} \quad (113)$$

În fig. 15 se vede reprezentarea grafică a cazului unei curgeri sferice în condiții asemănătoare celei din fig. 11. În fig. 15 sînt trasate prin linii punctate curbele din fig. 11 și prin linii întregi curbele obținute pentru distribuția potențialului Φ și a vitezei v în cazul unei curgeri sferice.

Se vede că în curgerea sferică, potențialul scade brusc la o distanță foarte mică de gaura de sondă, în timp ce viteza crește foarte mult. Analitic, această creștere mult mai mare a vitezei în jurul găurii de sondă la o curgere radial sferică se datorește faptului că viteza este invers proporțională cu pătratul razei r [ecuația (113)], spre deosebire de curgerea radial-plană, unde este invers proporțională cu raza r [ecuația (91)].

Scăderea mult mai bruscă a potențialului se explică prin faptul că la curgerea sferică potențialul variază proporțional cu raza [ecuația (112)], iar în cazul curgerii radial-plane, potențialul este

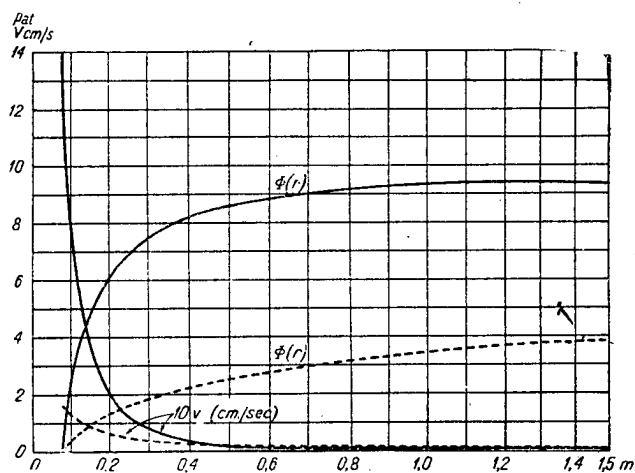


Fig. 15. Distribuția vitezei și a potențialului în cazul unei curgeri radial-sferice comparată cu distribuția obținută în cazul figurii 16, pentru același valori, $\frac{k}{\mu} = 1$; $r_s = 7,5$ cm; $r_d = 150$ m; $p_s = 0$ at; $p_d = 10$ atm.

invers proporțional cu logaritmul razei [ecuația (90)].

Raportul între debitul unei sonde la curgerea radial-sferică [ecuația (110)] față de debitul curgerii radial-plane [ecuația (92)], rezultă

$$\frac{Q_{\text{sferic}}}{Q_{\text{radial-plan}}} = \frac{r_s}{h} \cdot \ln \frac{r_d}{r_s} \quad (114)$$

b. Curgerea fluidelor omogene și incompresibile care nu respectă legea liniară de filtrare (Legea lui Darcy)

La o curgere ce nu respectă legea lui Darcy, viteza se exprimă sub forma [v. ec. (31) și (32)]:

$$v = -c \left(\frac{dp}{ds} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (115)$$

în care: c și n sint constante, iar n variază între 1 și 2.

dp este diferența de presiune;

ds — elementul de drum.

1. **Curgerea unidimensională printr-un mediu poros a unui fluid omogen și incompresibil.** Condițiile de curgere sint aceleași cu condițiile fig. 9, pentru cazul cînd era valabilă legea lui Darcy. Procedînd în același mod la rezolvarea problemei și ținînd seama de ecuația (115) se obține:

— Distribuția presiunii este dată de relația:

$$p = p_d - \frac{p_d - p_s}{L} x \quad (116)$$

în care p este lungimea corespunzătoare unei distanțe x de la conturul de alimentare. Aceasta înseamnă că, în cazul unui regim nelinier de filtrare, distribuția presiunii este identică cu cea valabilă în cazul regimului linier de filtrare. Ecuația (116) este identică cu ecuația (75).

— Ecuația debitului este dată de relația

$$Q = cF \left(\frac{p_d - p_s}{L} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (117)$$

unde F este secțiunea mediului poros și L lungimea acestuia.

2. **Curgerea radial-plană a fluidelor omogene și incompresibile.** Pe baza aceleiași ecuații (115) și ținînd seama de condițiile de curgere se ajunge la următoarele expresii pentru presiune și debit.

— Distribuția presiunii p este

$$p = p_d - \left(\frac{Q}{2\pi hc} \right)^n \frac{1}{n-1} \left(\frac{1}{r^{n-1}} - \frac{1}{r_d^{n-1}} \right) \quad (118)$$

în care h este grosimea mediului poros, iar p presiunea corespunzătoare unei distanțe r de la centrul gaurii de sondă.

— Ecuația debitului este

$$Q = 2\pi hc \left[\frac{(n-1)(p_d - p_s)}{\left(\frac{1}{r_s} \right)^{n-1} - \left(\frac{1}{r_d} \right)^{n-1}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (119)$$

care după cum se vede este foarte diferită de ecuația (92) din curgerea radial-plană. Această ecuație seamănă ca aspect mai mult cu ecuația curgerii radial-sferice.

Particularizînd ecuațiile (118) și (119) pentru limitele extreme ale lui n se obține:

$n = 1$ — atunci se obține după ridicarea nedeterminărilor chiar ecuațiile (90) și (92) curgerii radial-plane.

În cazul $n = 2$ este valabilă legea de filtrare a lui Crasnopolschi. Dacă în acest caz se neglijează $\frac{1}{r_d^{n-1}}$ față de $\frac{1}{r^{n-1}}$ și de $\frac{1}{r_s^{n-1}}$ se obține

Tabela 6. Unități de măsură ale permeabilității și cordația între sistemele de măsură

	Darcy $\frac{1 \text{ cm}^3}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 (\text{at}/\text{cm})}$	$\frac{1 \text{ cm}^3}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 (\text{dyne}/\text{cm}^2)/\text{cm}}$	$\frac{1 \text{ picior}^3}{\text{s} \cdot \text{picior}^2 (\text{at}/\text{picior})}$	$\frac{1 \text{ picior}^3}{\text{s} \cdot \text{picior}^2 (\text{livră}/\text{ol}^2)/\text{picior}}$	$\frac{1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O} (20^\circ)}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 (1 \text{ cm H}_2\text{O}/\text{cm})}$	$\frac{1 \text{ gallon H}_2\text{O} (20^\circ)}{\text{min} \cdot \text{picior}^2}$
Darcy $\frac{1 \text{ cm}^3}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 (\text{at}/\text{cm})} =$	1	$9,8697 \cdot 10^{-7}$	$1,0164 \cdot 10^{-3}$	$7,3243 \cdot 10^{-5}$	$9,6130 \cdot 10^{-4}$	$1,4156 \cdot 10^{-3}$
$\frac{1 \text{ cm}^3}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 (\text{dyne}/\text{cm}^2)/\text{cm}} =$	$1,0132 \cdot 10^6$	1	$1,0906 \cdot 10^{-3}$	74,210	$9,7399 \cdot 10^{-2}$	$1,4342 \cdot 10^4$
$\frac{1 \text{ picior}^3}{\text{s} \cdot \text{picior}^2 (\text{at}/\text{picior})} =$	$9,2904 \cdot 10^2$	$9,1693 \cdot 10^{-4}$	1	$6,8046 \cdot 10^{-2}$	0,89302	13,151
$\frac{1 \text{ picior}^3}{\text{s} \cdot \text{picior}^2 (\text{livră}/\text{ol}^2)/\text{picior}} =$	$1,3653 \cdot 10^4$	$1,3475 \cdot 10^{-2}$	14,696	1	13,124	$1,9327 \cdot 10^2$
$\frac{1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O} (20^\circ)}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 (1 \text{ cm H}_2\text{O}/\text{cm})} =$	$1,0403 \cdot 10^3$	$1,0267 \cdot 10^{-3}$	1,1198	$7,6195 \cdot 10^{-2}$	1	14,725
$\frac{1 \text{ gallon H}_2\text{O} (20^\circ)}{\text{min} \cdot \text{picior}^2} =$	70,644	$6,9724 \cdot 10^{-5}$	$7,6041 \cdot 10^{-2}$	$5,1742 \cdot 10^{-3}$	$6,7910 \cdot 10^{-2}$	1

Primele patru unități se referă la un fluid cu viscozitatea 1 cP; viscozitatea apei la 20° avînd valoarea 1,005 cP.

— distribuția presiunii

$$p = p_d - \left(\frac{Q}{2\pi h c} \right)^2 \frac{1}{r} \quad (120)$$

și ecuația debitului

$$Q = 2\pi h c \sqrt{r_s(p_d - p_s)}. \quad (121)$$

Pe baza ultimelor două ecuații (120) și (121) se poate determina raportul nivelelor piezometrice (fig. 14).

$$\frac{p_d - p}{p_d - p_s} = \frac{s'}{s} = \frac{r_s}{r}. \quad (122)$$

c. Curgerea unui fluid omogen și incompresibil într-un mediu poros în ipoteza că există simultan două regimuri de filtrare

În curgerea unui fluid spre gaura de sondă, așa cum s-a arătat pentru fiecare curgere, există o ecuație a distribuției vitezei. Problema ce se pune este, dacă, în deplasarea fluidului spre gaura de sondă, legea liniară (a lui Darcy) de filtrare este valabilă în întreg mediul poros sau nu.

Răspunsul la problema dacă regimul de filtrare este liniar sau neliniar se obține pe baza numărului Reynolds critic (Re_{cr}) din ecuația (40) a lui N. V. Scelkacev

$$Re_{cr} = \frac{10}{m^{2,3}} \cdot \frac{v_{cr} \sqrt{k}}{v}.$$

Valoarea numărului Re_{cr} a fost determinată experimental și anume:

pentru nisipuri cimentate $Re_{cr} = 1$

pentru nisipuri necimentate $Re_{cr} = 4$.

Din ecuația (40) se poate extrage v_{cr} care este

$$v_{cr} = \frac{v m^{2,3}}{10 \sqrt{k}} Re_{cr} \quad (128)$$

în care se introduc toate valorile ce caracterizează mediul poros și fluidul, precum și numărul Re_{cr} . Pe această bază, din ecuația (128) se obține o viteză critică v_{cr} valabilă pentru condițiile de curgere a mediului poros respectiv.

Examinînd posibilitatea existenței a 2 regimuri de filtrare se va compara v_{cr} cu vitezele ce se obțin pentru fiecare tip de curgere în parte.

La curgerea unidimensională viteza se determină cu ecuația (76)

$$v = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{p_c - p_s}{L}$$

care, în acest caz, este constanta în întreg mediul poros.

Dacă $v < v_{cr}$ atunci regimul de curgere din strat este liniar.

Dacă $v > v_{cr}$ atunci regimul de curgere din strat este neliniar.

Se vede de aci, că pentru o curgere liniară nu există posibilitatea de a avea două regimuri de filtrare în strat.

La curgerea radial-plană, viteza se determină cu ecuația (91)

$$v = - \frac{k}{\mu} \cdot \frac{p_d - p_s}{\ln r_d / r_s} \cdot \frac{1}{r}$$

în care viteza variază logaritmic cu distanța r de la centrul sondei.

Întrucît viteza crește cu cît lichidul se apropie de gaura de sondă [vezi fig. (9)] înseamnă că:

Viteza minimă v_{min} are loc la conturul de alimentare de rază r_d .

Viteza maximă v_{max} are loc la conturul sondei de rază r_s .

De aci se deduce că, dacă viteza critică v_{cr} are o valoare cuprinsă între v_{max} și v_{min} există două regimuri de filtrare:

2 regimuri de filtrare $\begin{cases} \text{între } v_{min} - v_{cr} \text{ regim liniar} \\ \text{între } v_{cr} - v_{max} \text{ regim neliniar} \end{cases}$

iar dacă

$v_{cr} > v_{max}$ — un singur regim de filtrare (regim liniar)

$v_{cr} < v_{min}$ — un singur regim de filtrare (regim neliniar)

La o curgere radial-sferică, viteza se determină cu ecuația (109)

$$v = (\Phi_d - \Phi_s) r_s \cdot \frac{1}{r^3}$$

în care viteza variază invers proporțional cu pătratul distanței r de la centrul sondei. Posibilitățile existenței a 2 regimuri de filtrare se încadrează în posibilitățile arătate pentru curgerea radial-plană. Există însă o singură deosebire și anume, viteza scăzînd mult mai brusc la curgerea radial-sferică fig. (15), limita celor două regimuri se situează mult mai aproape de gaura de sondă.

Aceste cazuri au fost examinate în situația unor sonde perfecte hidrodinamic, adică netubate în dreptul stratului productiv.

În situația că sondele sînt tubate și perforate în dreptul stratului productiv (cazul cel mai frecvent în practică), atunci secțiunea micșorîndu-se foarte mult, viteza va crește în aceeași măsură. Viteza va depăși în general viteza critică și în strat vor exista două regimuri de filtrare. În general deci, se poate spune că:

— în cazul sondelor perfecte din punctul de vedere al modului de deschidere sînt mai multe posibilități să existe un singur regim de filtrare (regim liniar);

— în cazul sondelor imperfecte din punctul de vedere al modului de deschidere (tubate și perforate) sînt mai multe posibilități să existe două regimuri de filtrare.

Pentru a putea aprecia care este diferența între un regim liniar și un regim neliniar de filtrare, se poate vedea în figura (16) care este aspectul relației $Q \div \Delta P$, în cazul unei curgeri radial-plane.

Conform ecuației (92) variația $Q \div \Delta P$ este liniară și este reprezentată în curba $n = 1$.

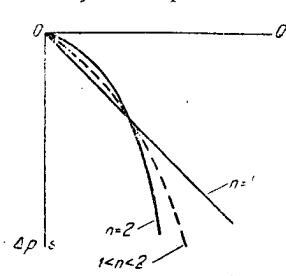


Fig. 16. Curbele $(Q\Delta P)$ corespunzătoare diferitelor legi de filtrare.

Linia punctată reprezintă variația $Q \div \Delta P$ în cazul ecuației (119) în care $1 < n < 2$.

Linia $n = 2$, reprezintă variația $Q \div \Delta P$, în cazul ecuației (121), în cazul limită al curgerii după legea lui Crasnopolschi.

Pentru curbele ce reprezintă ecuațiile (119) și (121) se vede că este nevoie de o diferență de presiune ΔP mai mare pentru a obține un același debit Q , în comparație cu curba $n = 1$.

d. Curgerea radial-plană asimetrică a fluidelor omogene și incompresibile

Practic, pe conturul de alimentare al unei sonde, presiunea este rareori uniform distribuită, conturul de alimentare nu este totdeauna perfect circular și simetric față de axul sondei și nici sonda nu este amplasată în centrul conturului de alimentare.

Pentru aceste cazuri de asimetrie s-au examinat mai multe ipoteze:

1. Curgerea spre o sondă în cazul când

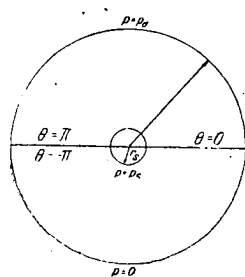


Fig. 17. Curgere radial-plană cu alimentare periferică parțială.

presiunea este neuniform (ca în fig. 17) distribuită pe conturul de alimentare. Din figura 17 rezultă că soluțiile problemei sînt în funcție de cele două variabile, unghiul θ și raza r .

Ecuația folosită este în acest caz ecuația lui Laplace în coordonate cilindrice [ecuația (4)], în care se iau primii

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} \right) = 0. \quad (123)$$

Cele două viteze sînt:

$$v_r = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r}, \quad v_\theta = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial \theta}$$

Soluțiile ecuației au forma următoare:

$$p = 1) \text{ const; } 2) \ln r; 3) r^\alpha \cos \alpha \theta; 4) r^{-\alpha} \cos \alpha \theta; 5) r^\alpha \sin \alpha \theta; 6) r^{-\alpha} \sin \alpha \theta. \quad (124)$$

Din faptul că ecuația diferențială (4) este liniară rezultă că suma soluțiilor constituie și ea o soluție, și în acest fel soluția generală are forma:

$$p = c_0 \ln r + \sum r^\alpha (a_\alpha \sin \alpha \theta + b_\alpha \cos \alpha \theta) + \sum r^{-\alpha} (c_\alpha \sin \alpha \theta + d_\alpha \cos \alpha \theta) \quad (125)$$

unde constantele $c_0, a_\alpha, b_\alpha, c_\alpha, d_\alpha$, sînt constante independente de r și de θ .

Punind condiția ca θ să fie cuprins între $-\pi$ și $+\pi$ și dacă valorile lui p la contur sînt exprimate prin seriile lui Fourier, condițiile-limită au forma următoare:

— pentru $r = r_s$:

$$p = p_s = \sum (w_n \sin n\theta + X_n \cos n\theta) \quad \text{la } -\pi \leq \theta \leq \pi$$

pentru $r = r_d$:

$$p = p_d = \sum (e_n \sin n\theta + f_n \cos n\theta) \quad \text{la } -\pi \leq \theta \leq \pi. \quad (126)$$

Aceste condiții (126) fiind introduse în ecuația generală (123) dau distribuția presiunii și viteza.

Pe baza vitezei obținute debitul va fi:

$$Q = - \int_{-\pi}^{+\pi} r v_r d\theta = \frac{2\pi k h \left(\frac{p_d}{2} - p_s \right)}{\mu \ln r_d / r_s}. \quad (127)$$

Comparind ecuația (127) cu ecuația (92) a debitului, în care p_d este presiunea uniform distribuită pe întreg conturul, rezultă că ecuația rămîne aceeași, dacă se consideră că presiunea p_d care acționează pe un semicerc, ar acționa pe întregul contur cu o jumătate din valoarea acesteia $\frac{p_d}{2}$.

Această expresie este valabilă și dacă presiunea acționează pe un arc de cerc:

$$Q = 2\pi k h \frac{\left[\frac{p_d S}{2\pi} - p_s \right]}{\mu \ln r_d / r_s} \quad (128)$$

Pentru generalizare, se poate scrie:

$$Q = \frac{2\pi k h (\bar{p}_d - \bar{p}_s)}{\mu \ln r_d / r_s} \quad (129)$$

unde \bar{p}_d și \bar{p}_s sînt presiunile medii pe contur și în sondă. Formula (126) convine practic

foarte bine, întrucît aparatele de măsură înregistrează (cu sonda închisă) o presiune medie \bar{p}_d și (cu sonda curgînd) o presiune medie \bar{p}_s .

2. Curgerea spre o sondă situată excentric față de conturul circular de alimentare. Pentru rezolvarea acestei probleme se folosește

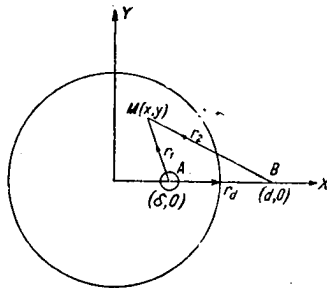


Fig. 18. O sursă $(\delta, 0)$ și imaginea ei la $(d, 0)$ oglindită față de conturul circular de alimentare la raza $r = r_d$.

funcția lui Green, cu ajutorul căreia se poate soluționa problema de față.

În ipoteza a două surse, A pozitivă și B negativă, la distanțele δ și d de centrul cercului cu rază r_d (fig. 18) presiunea în $M(x, y)$ este:

$$p = \ln r_2/r_1 + \text{const} = \ln r_2/r_1. \quad (130)$$

Obținînd distribuția presiunii prin intermediul funcției lui Green se ajunge la ecuația debitului de forma:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{2\pi kh(p_d - p_s)}{\mu \ln \frac{r_d^2 - \delta^2}{r_d \cdot r_s}} = \\ &= \frac{2\pi kh(p_d - p_s)}{\mu \ln \frac{r_d^2 - \delta^2}{r_d \cdot r_s}} \quad (131) \end{aligned}$$

în care δ reprezintă distanța de la centrul conturului de alimentare la centrul găurii de sondă.

Raportul între debitul Q al sondei excentrice dat de ecuația (131) și debitul Q_0 al sondei simetrice [ecuația (92)] este

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\frac{2\pi kh(p_d - p_s)}{\mu \ln \frac{r_d^2 - \delta^2}{r_d \cdot r_s}}}{\frac{2\pi kh(p_d - p_s)}{\mu \ln r_d / r_s}}$$

sau

$$\frac{Q}{Q_0} = 1 - \frac{\ln \left(1 - \frac{\delta^2}{r_d^2} \right)}{\ln \frac{r_d}{r_s} + \ln \left(1 - \frac{\delta^2}{r_d^2} \right)} \quad (132)$$

Reprezentînd grafic pentru $r_d / r_s = 2000$, variația raportului Q/Q_0 , în funcție de raportul $\frac{\delta}{r_d}$, se obține curba din figura (19). Din această curbă se pot trage următoarele concluzii:

— pentru valori ale raportului $\frac{\delta}{r_d} \ll 0,5$,

adică pentru deplasarea sondei între centru și jumătate din r_d , diferențele sînt atît de mici, încît debitul se poate calcula și cu ecuația (92) fără a se comite o eroare;

— dacă raportul $\frac{\delta}{r_d} \geq 0,5$ se vede că valoarea raportului Q/Q_0 crește sensibil, și atunci debitul trebuie calculat numai cu ecuația (131), spre a nu se face erori.

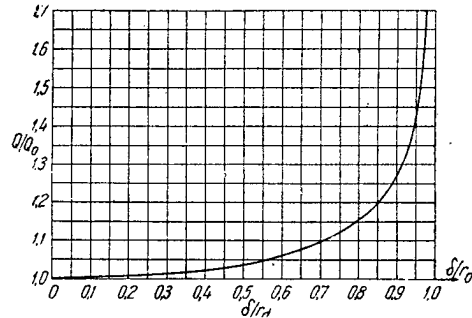


Fig. 19. Raportul $\frac{Q}{Q_0}$ în cazul sondei amplasate excentric față de conturul circular de alimentare ($r_s/r_d = 1/2000$).

De reținut, că debitul sondei crește pe măsură ce sonda se apropie de conturul de alimentare.

3. Curgerea spre o sondă în cazul unui contur liniar de alimentare de mărime infinită. În acest caz conturul de alimentare

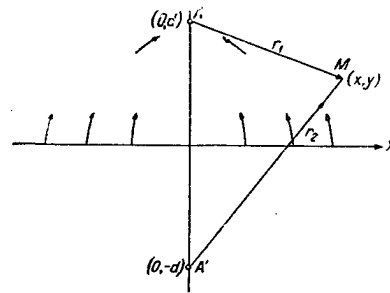


Fig. 20. Contur de alimentare liniar de mărime infinită alimentînd o sondă plasată pe axa Y de coordonate $(0, d)$.

are formă liniară și corespunde situației în care avansarea apei de sinclinal depășește țigheul în spre o sondă.

Se consideră, astfel, sursa liniară infinită axa X (fig. 20), iar pe axa Y , la distanța d de contur, se consideră plasată o sondă A cu raza r_s .

Se presupune că sonda ar avea presiunea p_s și, că la conturul de alimentare (prin absurd) presiunea ar fi egală cu zero:

În acest caz, potențialul presiunii va fi:

$$p = q \ln \frac{r}{r_s} + p_s \quad (133)$$

în care q este un coeficient arbitrar.

Dacă afară de sonda $A(0, d)$ din planul $y > 0$, se consideră o sondă ipotetică în planul $y < 0$ și dacă această sondă $A'(0, -d)$ va fi reflectată lui A față de axa X , se va considera aceasta ca o imagine negativă, astfel încât și potențialul ecuației (133) va fi negativ.

Efectul rezultat al celor două sonde A și A' este

$$p = q \ln \frac{r_1}{r_s} + p_s - q \ln \frac{r_2}{r_s} - p_s = q \ln \frac{r_1}{r_2}$$

în care r_1 și r_2 sînt distanțele de la sonda inițială și de la cea reflectată, la un punct din plan $M(x, y)$.

Dacă punctul M este pe conturul sondei ($r_1 = r_s$) și r_2 variază între $2d + r_s$ și $2d - r_s$, se vede că r_s este mult mai mic decât $2d$ încît p variază logaritmîc cu r_2 , care se consideră aproximativ egal cu $2d$, și astfel p devine:

$$p_s = q \ln \frac{r_s}{2d} \quad (134)$$

Dacă însă $r_1 = r_2$, p devine egal cu zero de-a lungul axei x și dacă se ține seama că pe conturul sondei acționează presiunea p_s , se determină:

$$p = \frac{p_s}{\ln r_s/2d} \ln r_1/r_2 \quad (135)$$

În cazurile practice, conturul de alimentare are o presiune p_d , încît soluția devine:

$$p = \frac{p_s - p_d}{\ln r_s/2d} \ln r_1/r_2 + p_d \quad (136)$$

Această ecuație exprimată analitic în coordonate carteziene și transformată, are forma:

$$x^2 + \left[y - d \frac{(1 + c^2)}{(1 - c^2)} \right]^2 = \frac{4d^2 c^2}{(1 - c^2)^2} \quad (137)$$

în care:

$$c = \frac{r_1^2}{r_2^2} = \frac{x^2 + (y - d)^2}{x^2 + (y + d)^2}$$

Se observă că izobarele sînt cercuri cu raza $\frac{2dc}{1 - c^2}$ cu centrul în $\left[0, d \frac{(1 + c^2)}{(1 - c^2)} \right]$ adică alcătuiesc o familie de cercuri cu centrul pe axa y (fig. 21), conturul liniar de alimentare fiind axa x .

Liniile echipotențiale sînt date pentru diferite valori, iar liniile de curent sînt cercuri ortogonale față de izobare, cuprinse între $-\pi$ și $+\pi$.

Debitul unei sonde în cazul unui contur liniar de alimentare este:

$$Q = \frac{2\pi kh(p_d - p_s)}{\mu \ln 2d/r_s} \quad (138)$$

Deci, debitul unei sonde plasată la o dis-

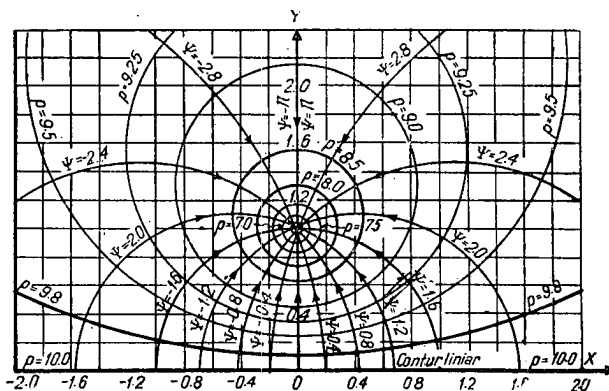


Fig. 21. Distribuția liniilor de curent și a liniilor echipotențiale în cazul unei sonde alimentată de un contur liniar de mărime infinită.

tanță d de un contur liniar infinit și avînd presiunea p_d , este același ca acela al unei sonde plasată în mijlocul unui contur circular cu raza $2d$ și cu aceeași presiune la conturul de alimentare.

4. Curgerea spre o sondă în cazul unui contur liniar de alimentare de mărime finită. În această situație sînt două cazuri:

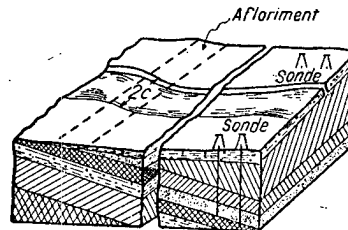


Fig. 22. Aspectul schematic al unui strat alimentat de un riu formînd astfel un contur finit de alimentare.

a) Cazul curgerii de la un contur liniar finit spre un strat infinit este reprezentat de figura (22). Stratul productiv ce aflorînd la

zi are o lățime infinită, iar pe o porțiune egală cu lungimea $2c$ este alimentat de o apă activă.

Cu ajutorul funcțiilor de variabilă complexă, acest caz particular se încadrează în ecuația:

$$f(z) = p + i\psi = \operatorname{arctg} \frac{x + iy}{c} \quad (139)$$

în care c este o constantă și p — presiunea (în locul potențialului Φ).

Prin separarea părților reale de cele imaginare se obțin ecuațiile:

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^2}{c^2 \cdot \operatorname{ch}^2 p} + \frac{y^2}{c^2 \cdot \operatorname{sh}^2 p} &= 1 \\ \frac{x^2}{c^2 \operatorname{ch}^2 \psi} + \frac{y^2}{c^2 \operatorname{sh}^2 \psi} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (140)$$

în care curbele izobare $p = \text{const}$ sînt elipse confocale, cu focarul la $x = \pm c$ și cu semiaxele $c \cdot \operatorname{ch} p$ și $c \cdot \operatorname{sh} p$, iar liniile de curent $\psi = \text{const}$, sînt hiperbole confocale cu semiaxele $c \cos \psi$ și $c \sin \psi$, ca în fig. 23.

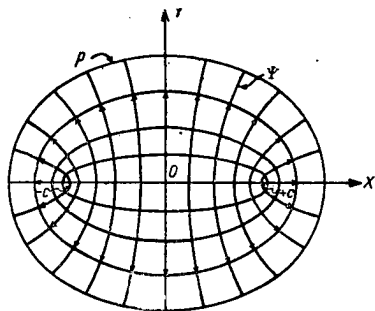


Fig. 23. Distribuția liniilor de curent și a liniilor echipotențiale în cazul unui contur finit de alimentare.

Aceste curbe reprezintă distribuția presiunii și a liniilor de curent într-un sistem în care p_d este presiunea uniformă menținută pe conturul eliptic:

$$\frac{x^2}{a_d^2} + \frac{y^2}{b_d^2} = 1.$$

și p_s — presiunea pe suprafața eliptică confocală interioară:

$$\frac{x^2}{a_s^2} + \frac{y^2}{b_s^2} = 1.$$

Cînd $b_s = 0$, elipsa interioară degenerază într-un contur liniar finit, cu lungimea $2c$.

Pentru o diferență de presiune Δp menținută între sursă și elipsa exterioară, a cărei semiaxă mică este b_d , debitul este:

$$Q = \frac{2\pi k \Delta p}{\mu \ln \frac{a_d + b_d}{c}} = \frac{2\pi k \Delta p}{\mu \ln \frac{b_d + \sqrt{c^2 + b_d^2}}{c}} \quad (141)$$

în care $2c$ reprezintă lungimea conturului de alimentare.

b) Cazul curgerii de la un contur liniar de alimentare, spre o sondă situată la distanță finită. În această situație se consideră o sondă $S(x_0, y_0)$ și amplasată în planul XOY ca în fig. 24 și alimentată de un contur liniar finit de extindere $2c$.

Utilizînd proprietățile funcțiilor conjugate se ajunge la o expresie a debitului de forma

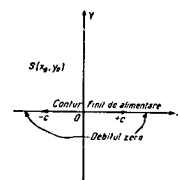


Fig. 24. Contur finit de alimentare, alimentînd sonda S de debitul de forma

$$Q = \frac{2\pi k h (p_d - p_s)}{\mu \ln \frac{4y_0}{r_s} \left[\frac{\sqrt{(c^2 - r_0^2) + 4y_0^2 c^2}}{c^2 - r_0^2 + \sqrt{(c^2 - r_0^2) + 4y_0^2 c^2}} \right]} \quad (142)$$

în care:

y_0 este distanța sondei de la conturul de alimentare;

r_0 — distanța de la centrul sondei la centrul conturului $r^2 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$;

c — jumătate din lungimea conturului de alimentare.

Cazuri particulare. 1) Cînd conturul de alimentare este de lungime infinită $c = \infty$ atunci ecuația (142) se reduce la forma

$$Q = \frac{2\pi k h (p_d - p_s)}{\mu \ln \frac{2y_0}{r_s}} \quad (143)$$

adică, tocmai ecuația (138) pentru un contur liniar de lungime infinită.

2) Dacă sonda S este amplasată pe axa y, adică $x_0 = 0$, atunci $r_0 = y_0^2$ și ecuația (142) devine:

$$Q = \frac{2\pi k h (p_d - p_s)}{\mu \ln \left[\frac{2y_0}{r_s} \left(1 + \frac{y_0^2}{c^2} \right) \right]} \quad (144)$$

sau

$$Q = \frac{2\pi k h (p_d - p_s)}{\mu \ln \left[\frac{2y_0}{r_s} \operatorname{cosec}^2 \frac{\theta}{2} \right]} \quad (145)$$

în care θ este unghiul-subîntins de conturul de alimentare la sondă.

Ecuația (144) seamănă cu ecuația (143), cu singura diferență că la numitor apare factorul

$1 + \frac{y_0^2}{c^2}$ în argumentul logaritmului.

Dacă $\frac{y_0}{c} \ll 1$, respectiv cînd distanța de la sondă la conturul de alimentare este foarte

mică, practic ecuația (144) coincide cu ecuația (143).

Dacă $\frac{y_0}{c} \gg 1$, atunci ecuația (144) devine identică cu ecuația (143) pentru cazul unui contur circular a cărei rază este proporțională cu cubul distanței y_0 .

Dacă sonda este așezată pe aceeași linie cu limitele conturului, adică:

$$x_0^2 = c^2$$

atunci ecuația debitului se poate scrie:

$$Q = \frac{2\pi kh(p_c - p_s)}{\mu \ln \frac{4y_0 \sqrt{4c^2 + y_0^2}}{r_s \sqrt{4c^2 + y_0^2 - y_0}}} \quad (146)$$

care arată că debitul Q este mult mai mic în acest caz, decît în cazul că sonda este amplasată la $x_0 = 0$.

Dacă distanța de la centrul conturului la centrul sondei este egală cu c , ecuația (142) devine:

$$Q = \frac{2\pi kh(p_d - p_s)}{\mu \ln \frac{4y_0}{r_s}} \quad (147)$$

care ecuație este independentă de x_0 .

e. Curgerea fluidelor omogene și incompresibile prin strate de permeabilitate neuniformă

Permeabilitatea într-un mediu poros natural suferă variații de la un punct la altul al mediului. Dacă variațiile lor nu diferă prea mult, mediul se consideră de permeabilitate uniformă și se calculează pentru permeabilitate o valoare medie.

Dacă însă permeabilitatea variază cu o anumită regularitate pe zone mari, atunci pot avea loc următoarele cazuri:

1. Variație discontinuă a permeabilității pe direcția perpendiculară cu stratificația. O serie de strate avînd fiecare o permeabilitate constantă, care însă diferă de permeabilitatea strateror vecine. În fig. 27 permeabilitatea stratului I este diferită de permeabilitatea stratului II.

2. Variația discontinuă a permeabilității pe direcția paralelă cu stratificația. În fig. 28 zona I are o permeabilitate constantă k_1 , iar zona II are o permeabilitate constantă k_2 . Trecerea de la zona I la zona II are loc brusc (discontinuu).

3. Permeabilitatea variază continuu într-o anumită direcție.

4. Permeabilitatea este constantă într-o direcție de curgere și variază brusc, la o schimbare de direcție. (Este tocmai cazul rocilor anizotrope).

1. Curgerea fluidelor omogene și incompresibile prin medii poroase de permeabilitate neuniformă după legea liniară de filtrare. În această situație în care este valabilă legea lui Darcy, curgerile care prezintă mai mult interes sînt curgerile unidimensionale și curgerea radial-plană.

a) Curgerea unidimensională. 1) Cazul variației discontinue a permeabilității pe direcția perpendiculară cu stratificația. În acest caz se consideră că în fig. 25 două strate I

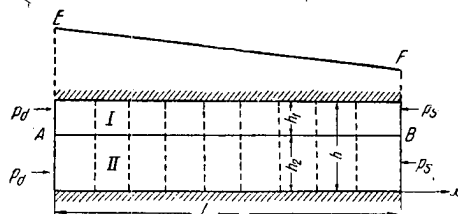


Fig. 25. Distribuția presiunii în cazul unei curgeri unidimensionale în cazul a două strate (I, II) de permeabilitate diferită.

și II sînt separate de planul AB. Acestea au permeabilitățile respective k_1 și k_2 , au o lungime L și grosimile respectiv h_1 și h_2 . La conturul de alimentare lucrează presiunea p_d și la gaura de sondă presiunea p_s .

În aceste condiții se obțin următoarele:

— Distribuția presiunii nu este modificată de permeabilitate, încît rămîne aceeași cu cea din cazul curgerii unidimensionale, studiată la subcapitolul II [ecuația (75)].

$$p = p_d - \frac{p_d - p_s}{L} x \quad (148)$$

în care p reprezintă presiunea corespunzătoare unei distanțe x de la conturul de alimentare.

Variația presiunii cu distanța este liniară (așa cum se vede linia EF) iar izobarele în secțiune verticală sînt niște linii drepte.

— Vitezele fiind în funcție de permeabilitate (după legea lui Darcy) vor fi diferite în stratul I și stratul II.

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \frac{k_1}{\mu} \cdot \frac{p_d - p_s}{L} \\ v_2 &= \frac{k_2}{\mu} \cdot \frac{p_d - p_s}{L} \end{aligned} \right\} \quad (149)$$

Se vede că viteza v_1 este constantă în stratul I pe întreaga lungime L iar v_2 este constantă în stratul II pentru orice punct al stratului productiv.

— Debitul reprezintă în acest caz, suma debitelor obținute din stratul I și stratul II.

Considerind la lăţimea stratului, debitul Q rezultă:

$$Q = \frac{a(p_d - p_s)}{\mu L} (k_1 h_1 + k_2 h_2) \quad (150)$$

sau

$$Q = \frac{ah(p_d - p_s)}{\mu L} k_m \quad (151)$$

în care permeabilitatea medie k_m este:

$$k_m = \frac{k_1 h_1 + k_2 h_2}{h} \quad (152)$$

2) Cazul variaţiei discontinue a permeabilităţii direcţiei paralele cu stratificaţia. Aspectul acestei situaţii este redat în secţiunea verticală din fig. 26 în care se consideră un strat

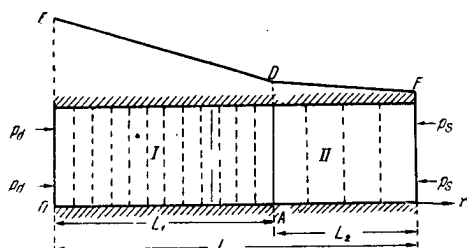


Fig. 26. Distribuţia presiunii în cazul curgerii unidimensionale pentru o variaţie discontinuă de permeabilitate în direcţia orizontală.

de lungimea L și grosime h . Acest strat are două zone și anume zona I de lungime L_1 cu o permeabilitate k_1 , și zona II de lungime L_2 cu o permeabilitate k_2 . La conturul de alimentare lucrează o presiune p_d și la gaura de sondă o presiune p_s .

Pentru rezolvarea problemei, s-a considerat că în A lucrează o presiune p_A și s-a tratat separat zona I și zona II, aplicându-se ecuațiile stabilite pentru o curgere unidimensională. Legătura între aceste zone s-a făcut pe baza continuității curgerii în zona AD.

În acest mod s-au stabilit următoarele:

- Distribuţia presiunii în funcţie de diferenţa de presiune $p_d - p_s$ este următoarea:
- în zona I

$$p_1 = p_d - \frac{k_2(p_d - p_s)}{k_1 L_2 + k_2 L_1} \cdot x \quad (153)$$

în care p_1 este presiunea corespunzătoare distanţei x de la contur;

— în zona II:

$$p_2 = p_s + \frac{k_1(p_d - p_s)}{k_1 L_2 + k_2 L_1} (L_1 + L_2 - x) \quad (154)$$

în care p_2 este presiunea corespunzătoare distanţei x de la contur. Variaţia acestei presiuni

apare tot liniară, dar se frînge în regiunea AD așa cum se vede pe linia EDF. Izobarele sînt reprezentate prin nişte linii drepte, într-o secţiune verticală sau orizontală.

Viteza, în funcţie tot de diferenţa de presiune $p_d - p_s$, apare astfel:

$$v = \frac{k_1 k_2 (p_d - p_s)}{\mu (k_1 L_2 + k_2 L_1)} = \frac{p_d - p_s}{\mu \left(\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} \right)} \quad (155)$$

care rămîne constantă în mediul poros ca și la curgerea unidimensională, în cazul unei permeabilităţi uniforme.

— Debitul se obţine din produsul secţiunii $a \cdot h$ cu viteza din ecuaţia (155)

$$Q = ah \frac{p_d - p_s}{\mu \left(\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} \right)} \quad (156)$$

în care a este lăţimea stratului productiv. Ecuaţia (156) se poate reduce la ecuaţia (73) admiţînd că permeabilitatea medie k_m este dată de raportul

$$k_m = \frac{L}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2}} \quad (157)$$

b) Curgerea radial-plană. În acest caz se ţinea seama de toate ecuaţiile unei curgeri radial-plane simetrice, stabilite la capitolul IV. Admiţînd deci simetria acestei curgeri se consideră sonda concentrică cu conturul circular de alimentare și presiunea uniform distribuită pe acest contur.

1) Cazul variaţiei discontinue a permeabilităţii pe direcţia perpendiculară cu stratificaţia. Se consideră în fig. 27 un strat I de grosime h_1 ,

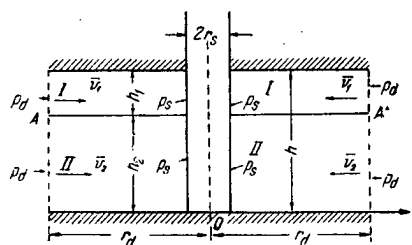


Fig. 27. Secţiune verticală în cazul unei curgeri radial-plane pentru o variaţie discontinuă de permeabilitate pe direcţia verticală.

și de permeabilitate k_1 , și un strat II de grosime h_2 și permeabilitate k_2 . Stratul are un contur circular de alimentare r_d , la care lucrează o presiune p_d în centrul căruia este săpată o sondă de rază r_s pe care lucrează o presiune p_s .

— Distribuția presiunii. Presiunea este independentă de permeabilitate și distribuția presiunii este aceeași în ambele strate, întrucât la conturul de alimentare și la conturul sondei, presiunile sînt aceleași.

$$p = p_d - \frac{p_d - p_s}{\ln r_d/r_s} \cdot \ln \frac{r_d}{r} \quad (158)$$

Aspectul izobarelor este același ca și în curgeri radial-plană studiată la capitolul IV, adică niște cercuri într-o secțiune orizontală și niște linii drepte în secțiune verticală.

Vitezele sînt diferite în stratul I și II, întrucît viteza este funcția de permeabilitate. Deci:

$$v_1 = \frac{k_1}{\mu} \frac{p_d - p_s}{\ln r_d/r_s} \cdot \frac{1}{r} \quad v_2 = \frac{k_2}{\mu} \frac{p_d - p_s}{\ln r_d/r_s} \cdot \frac{1}{r}$$

sau raportul vitezelor este :

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{k_1}{k_2} \quad (159)$$

Debitul Q este dat de suma debitelor din stratul I și stratul II

$$Q = \frac{2\pi (k_1 h_1 + k_2 h_2) (p_d - p_s)}{\mu \ln r_d/r_s} = \frac{2\pi k_m h (p_d - p_s)}{\mu \ln r_d/r_s} \quad (160)$$

în care permeabilitatea medie

$$k_m = \frac{k_1 h_1 + k_2 h_2}{k_1 + k_2} \quad (161)$$

Ecuția (92) seamănă foarte bine cu ecuația (161) în care permeabilitatea medie este k_m .

2) Cazul variației discontinue a permeabilității pe direcția paralelă cu stratificația. Se consideră un strat de grosime h ca în fig. 28

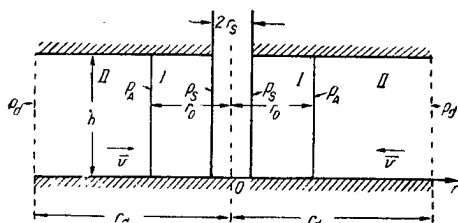


Fig. 28. Secțiune verticală în cazul unei curgeri radial-plană pentru o variație discontinuă de permeabilitate pe direcția orizontală.

(secțiune verticală) a cărui contur circular este de rază r_d pe care lucrează o presiune p_d . În centrul acestui contur circular este săpată o sondă de rază r_s pe conturul căreia lucrează o presiune p_s .

În strat sînt două zone: zona I între r_s și r_c de permeabilitate k_1 (ca în fig. 29) secțiune

orizontală și o a doua zonă II între r_d și r_0 a cărei permeabilitate este k_2 .

Pentru rezolvarea problemei se descompune mediul poros în 2 zone circulare I și II, fiecare de permeabilitate uniformă k_1 și k_2 .

— Distribuția presiunii. Între r_d și r_0 presiunea este cuprinsă între p_d și p_A , iar între r_0 și r_s presiunea este cuprinsă între p_A și p_s . Ținând seama de continuitatea curgerii la distanța

r_0 și ca o consecință de egalitatea vitezelor în suprafața de discontinuitate se obține astfel distribuția presiunii în funcție de presiunea diferențială $p_d - p_s$:

În regiunea I ($r_s < r < r_0$)

$$p_1 = p_s + \frac{p_d - p_s}{\ln \frac{r_0}{r} + \alpha \ln \frac{r_d}{r_0}} \ln \frac{r}{r_s} \quad (162)$$

în care p_1 este presiunea corespunzătoare distanței r de la centrul conturului.

În regiunea II ($r_0 < r < r_d$)

$$p_2 = p_d - \frac{\alpha (p_d - p_0)}{\ln \frac{r_0}{r_s} + \alpha \ln \frac{r_d}{r_0}} \cdot \ln \frac{r_d}{r} \quad (163)$$

în care $\alpha = \frac{k_1}{k_2}$.

Pe baza acestor ecuații pentru o diferență de presiune $p_d - p_s = 7$ at în cazul unei raze de contur $r_d = 200$ m, a unei raze de

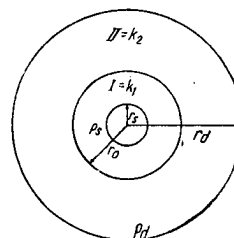


Fig. 29. Secțiune orizontală în cazul unei curgeri radial-plană, pentru o variație discontinuă de permeabilitate pe direcția orizontală.

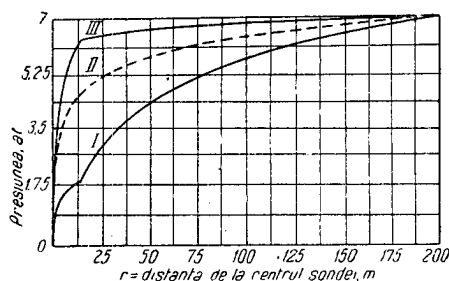


Fig. 30. Distribuția presiunii în cazul unei curgeri radial-plană cu o variație discontinuă de permeabilitate pe direcția paralelă cu stratificația. Curba I $\alpha = 5$, curba II $\alpha = 1$, curba III $\alpha = 1/5$ ($r_s = 7,5$ cm, $r_0 = 15$ m, $r_d = 200$ m, $\Delta p = 7$ at).

sondă $r_s = 7,5$ cm pentru o suprafață de discontinuitate aflată la o rază $r_0 = 15$ m, se

obține distribuția presiunii din figura 30. Din această distribuție se vede că față de cazul unei sonde cu permeabilitate uniformă (curba II), pe curbele I și III apare o discontinuitate la raza r_0 . Pentru cazul lui $\alpha = 5$ se obține curba

I și pentru $\alpha = \frac{1}{5}$ se obține curba III.

Distribuția vitezei rezultă din ecuația

$$v = \frac{k_1 k_2 (p_d - p_s)}{\mu \left(k_2 \ln \frac{r_0}{r_s} + k_1 \ln \frac{r_d}{r_0} \right)} \cdot \frac{1}{r} \quad (164)$$

care este valabilă pentru orice punct din ambele zone.

Debitul este dat de produsul suprafeței $2\pi r h$, cu viteza v din ecuația (164) deci,

$$\begin{aligned} Q &= \frac{2\pi k_1 h (p_d - p_s)}{\mu \left(\ln \frac{r_0}{r_s} + \frac{k_1}{k_2} \ln \frac{r_d}{r_0} \right)} = \\ &= \frac{2\pi h (p_d - p_0)}{\mu \left(\frac{1}{k_1} \ln \frac{r_0}{r_s} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_d}{r_0} \right)} = \\ &= \frac{2\pi k_m h (p_d - p_s)}{\mu \ln r_d / r_s} \end{aligned} \quad (165)$$

în care permeabilitatea medie k_m este

$$k_m = \frac{\ln r_d / r_s}{\frac{1}{k_1} \ln \frac{r_0}{r_s} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_d}{r_0}} \quad (166)$$

Pentru a se putea aprecia raportul debitului Q în cazul variației permeabilității, față de debitul Q_0 în cazul permeabilității uniforme ecuația (92), rezultă:

$$\begin{aligned} \frac{Q}{Q_0} &= \frac{\frac{2\pi k_1 (p_d - p_s)}{\mu \left(\ln \frac{r_0}{r_s} + \alpha \ln \frac{r_d}{r_0} \right)}}{\frac{2\pi k_2 (p_d - p_s)}{\mu \ln r_d / r_s}} = \\ &= \frac{\alpha \ln r_d / r_s}{\ln \frac{r_0}{r_s} + \alpha \ln \frac{r_d}{r_0}} \end{aligned} \quad (167)$$

3) Aplicațiile curgerii fluideelor prin strate de permeabilitate neuniformă în probleme de exploatare. La aplicația acestor ecuații obținute pentru o curgere radial-plană s-a examinat aspectul hidrodinamic al acidizării și colmatării sondelor și al astupării perforaturilor.

α) Acidizarea și colmatarea sondelor. Acidizarea are loc prin injectarea unei soluții

acide în stratul productiv, cu scopul de a dizolva carbonații în vederea măririi permeabilității pe o zonă anumită în jurul găurii de sondă.

Colmatarea sondei este consecința pătrunderii în stratul productiv a filtratului de noroi în timpul forajului, ceea ce duce la micșorarea permeabilității stratului față de permeabilitatea inițială.

În acest sens, dacă se consideră permeabilitatea inițială k_2 și permeabilitatea ce se modifică în jurul sondei k_1 atunci

raportul $\alpha = \frac{k_1}{k_2} > 1$ reprezintă o acidizare

raportul $\alpha = \frac{k_1}{k_2} < 1$ reprezintă o colmatare

raportul $\alpha = \frac{k_1}{k_2} = 1$ reprezintă o permeabilitate uniformă.

Examinându-se raportul $\frac{Q}{Q_0}$ din ecuația

(167) în funcție de valoarea $\alpha = \frac{k_1}{k_2}$ pentru diverse valori ale lui r_0 , s-a putut trasa diagrama din fig. 31. În această diagramă este repre-

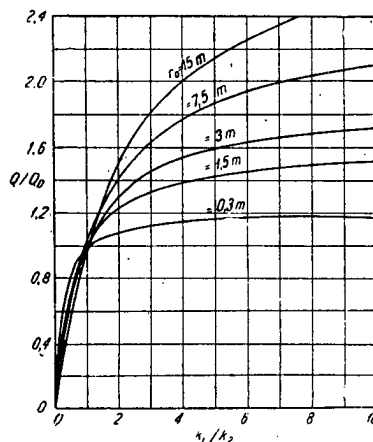


Fig. 31. Variația raportului debitelor Q/Q_0 în cazul unei curgeri radial-plane pentru o variație continuă a permeabilității pe direcția orizontală ($r_s = 7,5$ cm; $r_d = 200$ m).

zentat cazul unei sonde de rază $r_s = 7,5$ cm și alimentată de un contur $r_d = 200$ m, pentru r_0 cuprins între 0,3 și 15 m, și pentru k_1/k_2 între 0 și 10.

Din curbele trasate în fig. 31 se pot extrage următoarele:

— Pentru $\alpha = 1$ raportul $q/q_0 = 1$, adică pentru o permeabilitate uniformă debitul este chiar cel din ecuația (92).

— Pentru $0 < \alpha < 1$ cazul colmatării, se vede că efectul colmatării este cu atât mai redus cu cât raza r_0 (adîncimea de pătrundere a filtratului) este mai mică. Debitul este mult mai mic pentru raze r_0 mai mari și în general se

vede influența deosebită a colmatării, care pentru valori nu prea importante duce la scăderi considerabile de debit.

— Pentru $1 < \alpha < 10$ — cazul acidizării se vede că efectul acidizării nu crește continuu pentru creșterile lui r_0 . Astfel:

— Acidizarea ce duce la o mărire a permeabilității de 2 pînă la 4 ori are un efect important asupra măririi debitului. Efectul acesta scade pentru creșteri mai mari ale permeabilității, devenind neglijabil la valori ale lui $\alpha > 10$ (după cum se vede aplatizarea curbelor din fig. 31).

— Acidizarea pe o rază mai mare are un efect sensibil, dar față de greutatea practică în vederea obținerii unei acidizări pe o rază de 7,5–15 m, surplusul de debit obținut este foarte mic.

β) Efectele variației permeabilității asupra debitului. Creșterea debitului unei sonde este obiectivul principal al exploatării sondelor, iar debitul este cu atât mai mare cu cît permeabilitatea stratului productiv este mai mare. Creșterea permeabilității se poate obține prin:

β_1) Mărirea într-o zonă din jurul găurii de sondă a permeabilității, de la valoarea inițială la o valoare mult mai mare.

β_2) Eliminînd colmatarea din zona din jurul găurii de sondă, se poate obține revenirea permeabilității pînă la valoarea inițială a stratului productiv.

β_3) Crearea sau lărgirea fisurilor.

Cazul β_1 este tocmai cel obținut pentru $\alpha > 1$. Se observă cum creșterile debitului nu pot atinge valori prea mari, așa cum a fost expus mai înainte.

Cazul β_2 — creșterile posibile de debit sînt arătate în fig. 32. Aci s-a examinat cazul unei sonde de rază $r_s = 7,5$ cm săpată, într-un contur circular de rază $r_d = 200$ m. Stratul productiv în urma colmatării pe o rază r_0 , are o permeabilitate inițială k_i înainte de acidizare. Prin acidizare, zona de permeabilitate k_i urmează să atingă valoarea k_2 .

Dacă sonda a fost foarte colmatată și acidul are timpul necesar să libereze porii astupați, se obțin creșteri ale debitului foarte mari. Raportul Q/Q_0 (în care Q este debitul, după acidizare și Q_0 debitul înainte de acidizare) ajunge pentru cazul $k_1 \approx 0$ la valori infinite de mari.

Cazul β_3 — pentru a putea examina mărirea debitului ca urmare a lărgirii fisurilor prin acidizare, s-au trasat curbele din fig. 33. Aci se vede că prin lărgirea fisurilor, efectele asupra raportului debitelor Q/Q_0 sînt următoarele:

— Efectul măririi debitului este mai important la lărgirea fisurilor mici decît la fisurile mari (exemplu $w_i = 0,01$ mm față de $w_i = 0,5$ mm.).

— Pentru două fisuri de aceeași mărime ($w_i = 0,1$ mm) raportul debitelor q/q_0 crește mai mult la valori mici ale permeabilității (cum se vede pe cele două curbe punctate).

Rezultatele acidizării se pot interpreta astfel:

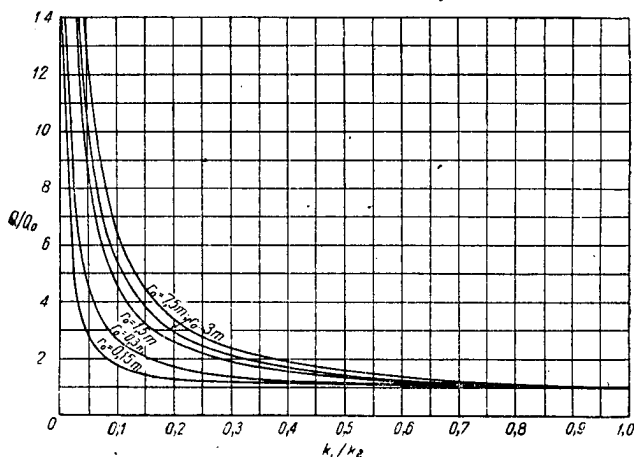


Fig. 32. Creșterea debitului în cazul unei curgeri radial-plane ca urmare a acidizării și anume ($r_s = 7,5$ cm, $r_d = 150$ m).

— Creșteri mici de debit (mai mici de 100 %) după o operație de acidizare se poate datora faptului, că pe o mică zonă în jurul găurii de

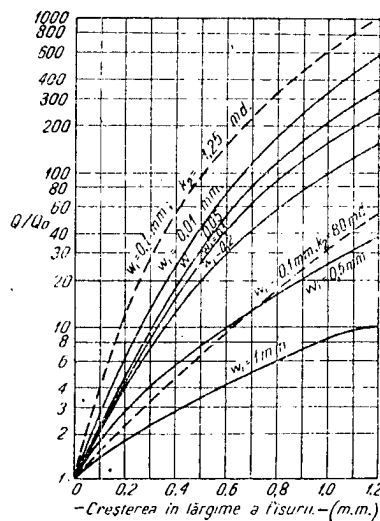


Fig. 33. Creșterea debitului în cazul curgerii omogene după acidizare, în funcție de creșterea în lărgime a fisurii (permeabilitatea $k_2 = 10$ m. D pentru curbele continue).

sondă permeabilitatea a crescut de la valoarea inițială la valori mult mai mari.

— Creșteri moderate ale debitului de 100 % — 1000 %, se pot explica în cazul unei curgeri radial-plane, prin faptul că inițial debitul era

foarte mic ca urmare a colmatării, iar efectul acidizării duce la creșteri deosebite ale debitului.

— Creșteri mai mari de 1000 % se pot datora unei lărgiri a fisurilor, ca urmare a acidizării.

Aceste trei efecte se pot combina și între ele.

γ) Astuparea cu nisip (innisiparea) a găurilor de sondă. O problemă interesantă pentru producție este cunoașterea efectului innisipării găurii de sondă asupra debitului acesteia. Hidrodinamic, această problemă a fost tratată ca o curgere printr-un strat cu permeabilitate discontinuă pe direcția paralelă cu stratificația.

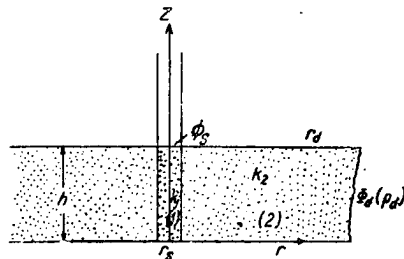


Fig. 34. Reprezentarea în secțiune verticală a unei sonde cu perforaturile innisipate.

În fig. 34 se vede un strat de rază r_2 (zona 2) a cărei permeabilitate este k_2 și nisipul ce a intrat în gaura de sondă de raza r_s constituie o zonă (1) de permeabilitate k_1 .

Folosind aceeași ecuație (4) a lui Laplace în coordonate cilindrice, s-au impus următoarele condiții-limită:

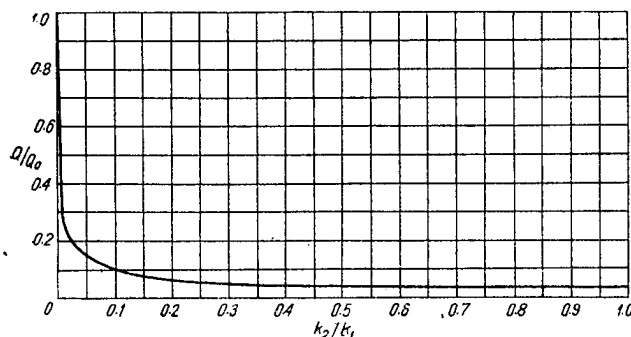


Fig. 35. Efectul innisipării găurii de sondă asupra debitului unei sonde (k_1 — permeabilitatea stratului, k_2 — permeabilitatea nisipului din coloană; $h = 7,5$ m; $r_s = 7,5$ cm; $r_d = 150$ m).

— Stratul productiv este impermeabil atât la acoperiș ($z = 1$) cât și la culcuș ($z = 0$).

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Phi_1}{\partial z} = 2c; \quad \frac{\partial \Phi_2}{\partial z} = 0 \quad \text{la } z = 1 \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \Phi_2}{\partial z} = 0 \quad \text{la } z = 0 \end{aligned} \right\} \quad (168)$$

— Continuitatea curgerii (a presiunii și vitezei) în zona de discontinuitate (în dreptul coloanei perforate):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Phi_1}{k_1} = \frac{\Phi_2}{k_2} \quad \text{la } r = r_s \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial r} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial r} \quad \text{la } r = r_s \end{aligned} \right\} \quad (168')$$

— La conturul de alimentare există același potențial

$$\Phi_2 \rightarrow \Phi_c \quad \text{la } r \rightarrow r_c \gg r_s. \quad (168'')$$

S-a găsit astfel prin introducerea condițiilor (168, 168', 168'') în ecuația (4), următoarea expresie pentru debitul:

$$Q = \frac{2\pi k_1 h r_s^2 (p_d - p_s)}{\mu \left[\frac{2}{3} + \frac{r_s^2}{2} + \alpha r_s^2 \ln \frac{r_d}{r_s} - \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{B}_n \right]} \quad (169)$$

în care

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} \quad (170)$$

iar $\bar{B}_n =$

$$= \frac{1}{n^3 \cdot \left[I_0(n\pi r_s) + \frac{\alpha I_1(n\pi r_s) K_0(n\pi r_s)}{K_1(n\pi r_s)} \right]} \quad (171)$$

unde I_0 și K_0 sînt funcții Bessel de specia treia și ordinul zero.

Raportînd debitul Q obținut în ecuația (169) la debitul Q_0 al unei sonde cu perforaturile neastupate [ecuația (92)] se obține

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\alpha r_s^2 \ln r_d/r_s}{\frac{2}{3} + \frac{r_s^2}{2} + \alpha r_s^2 \ln \frac{r_d}{r_s} - \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{B}_n} \quad (172)$$

Ecuația (172) a fost reprezentată grafic în diagrama fig. 35 pentru cazul unui strat productiv de grosime $h = 7,5$ m, cu un contur de alimentare circular $r_d = 150$ m și raza sondei $r_s = 7,5$ cm.

Din diagrama de față se pot extrage următoarele:

— Dacă permeabilitatea nisipului ce-a umplut gaura de sondă k_2 era de 200 ori mai mare ca permeabilitatea k_1 , debitul era redus la 34 % din valoarea sa originală.

La raportul $k_2 = 100 k_1$, debitul este redus la 12 %

La raportul $k_2 = 10 k_1$, debitul este redus la 6 %.

La raportul $k_2 = k_1$, debitul este același cu al unei sonde ce a atins stratul productiv (cazul curgerii radial-sferice)*).

Toate efectele menționate sînt agravate dacă coloana de nisip trece peste nivelul coperișului.

2. Curgerea fluidelor omogene prin medii poroase de permeabilitate neuniformă, după legea neliniară de filtrare a lui Crasnopolschi. Cazurile variațiilor de permeabilitate rîmînd aceleași, problemele se pot rezolva după criteriile asemănătoare prin modificarea vitezei, care în locul vitezei lui Darcy a fost înlocuită prin viteza lui Crasnopolschi

$$v = c \sqrt{\frac{dp}{dr}} = c(k)^{\frac{1}{2}} \quad (173)$$

Cazul variației discontinue a permeabilității pe direcția paralelă cu stratificația, într-o curgere radial-plană. Păstrînd aceleași elemente din fig. 29 s-au obținut:

— Distribuția presiunii în zona I $r_s < r < r_0$

$$p_1 = p_s + \left(\frac{Q}{2\pi h c_1} \right)^2 \left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r} \right) \quad (174)$$

în care p_1 este presiunea corespunzătoare distanței r de la centrul conturului și c_1 o constantă ce aparține legii neliniare de filtrare, în zona I.

În zona II $r_0 < r < r_d$

$$p_2 = p_d - \left(\frac{Q}{2\pi h c_2} \right)^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_d} \right) \quad (174')$$

în care p_2 este presiunea corespunzătoare distanței r de la centrul conturului și c_2 o constantă a legii neliniare de filtrare în zona II.

Valoarea debitului este:

$$Q = 2\pi h \sqrt{\frac{p_d - p_s}{\frac{1}{c_1^2} \left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_0} \right) + \frac{1}{c_2^2} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_d} \right)}} \quad (175)$$

și ținînd seama că dacă stratul ar avea o permeabilitate uniformă debitul Q_0 ar fi:

$$Q_0 = 2\pi h c_2 \sqrt{\frac{p_d - p_s}{\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_d}}} \quad (176)$$

Din raportul celor două ecuații se obține:

$$\frac{Q}{Q_0} = \sqrt{\frac{(r_d - r_s) r_0}{(r_d - r_0) r_s + \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^2 (r_0 - r_s) r_d}} \quad (177)$$

*) În cazul acestei analize, pentru simplificarea problemei, se face abstracție de existența unei coloane perforate (filtru) precum și de imperfecția ce o provoacă aceasta sondei.

sau înlocuind pe c_1 și c_2 după ecuația (173) se poate scrie:

$$\frac{Q}{Q_0} = \sqrt{\frac{(r_d - r_s) r_0}{(r_d - r_0) r_s + \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} (r_0 - r_s) r_d}} \quad (178)$$

sau admițînd că $r_d - r_s \cong r_d$ ecuația (178) devine:

$$\frac{Q}{Q_0} \cong \sqrt{\frac{1}{\frac{r_s}{r_0} \left(1 - \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \right) + \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}}} \quad (179)$$

Pentru cazul $k_2 > k_1$ s-a putut trasa o diagramă a raportului Q/Q_0 pentru diferite valori ale raportului $\alpha = \frac{k_1}{k_2}$, în diagrama din fig. 36.

Pe baza acestei diagrame, se poate observa că, în cazul curgerii unui lichid după legea

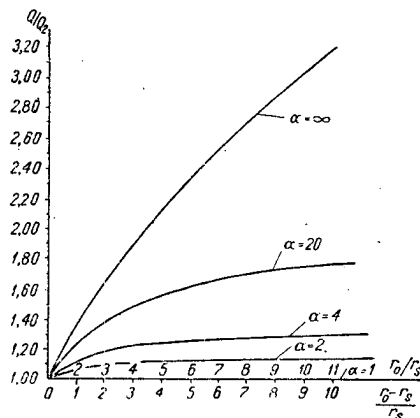


Fig. 36. Influența variației permeabilității în jurul găurii de sondă asupra debitului în cazul legii de filtrare a lui Crasnopolski.

lui Crasnopolschi, permeabilitatea zonei I exercită o influență mult mai mare asupra debitului sondei. Aci se vede că o mărire a permeabilității de 20 de ori în zona I, are un efect mult mai sensibil asupra debitului ca în cazul valabilității legii lui Darcy. (fig. 33).

f. Imperfecția sondelor

După Scelkacev o sondă se consideră perfectă sau imperfectă după următoarele criterii:

— O sondă este perfectă din punct de vedere al gradului de deschidere, dacă sonda a străpuns în întregime stratul productiv.

— O sondă este perfectă din punct de vedere al modului de deschidere, dacă lichidul intră în gaura de sondă pe întreaga suprafață a pereților sondei.

— O sondă este imperfectă din punct de vedere al gradului de deschidere, dacă sonda a deschis stratul productiv numai pe o parte din grosimea totală a acestuia.

— O sondă este imperfectă din punct de vedere al modului de deschidere, dacă lichidul intră în sondă pe o parte din suprafața pereților sondei (sonda este tubată și perforată în dreptul stratului productiv).

1. Imperfecțiunea sondelor din punctul de vedere al gradului de deschidere.

a) Sonda ce străpunge parțial un strat productiv izotrop. 1. Distribuția potențialului.

S-a considerat o sondă de rază r_s , fig. 37, care a străpuns pe o adâncime b un strat

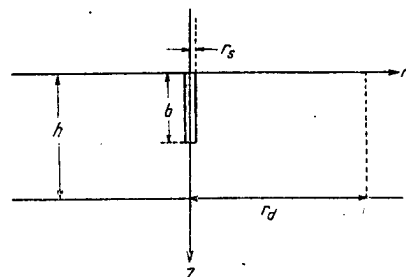


Fig. 37. Secțiunea verticală în cazul unei sonde ce a străpuns parțial un strat productiv.

productiv de grosime h . Stratul este considerat circular de rază r_d concentric cu gaura de sondă, iar pe conturul de alimentare lucrează presiunea p_d . Utilizând ecuația lui Laplace în coordonate cilindrice

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (180)$$

se impun următoarele condiții-limită:

Fluidul nu curge prin coperișul și culcușul stratului

$$V_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{la } z = 0, h \quad (181)$$

potențialul este uniform distribuit pe suprafața sondei

$$\Phi = \text{const} = \Phi_s \quad \text{la } r = r_s \text{ și } z \leq b \quad (181')$$

potențialul este uniform distribuit pe conturul de alimentare

$$\Phi = \text{const} = \Phi_c \quad \text{la } r = r_d$$

Toate lungimiile sînt raportate la dublul grosimii stratului ($2h$) exprimindu-se adimensional după cum urmează:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{r}{2h} & \rho_s &= \frac{r_s}{2h} & \rho_d &= \frac{r_d}{2h} \\ w &= \frac{z}{2h} & \text{și} & & x &= \frac{b}{2h} \end{aligned} \right\} \quad (181'')$$

Pentru rezolvarea ecuației (180) impunând condițiile-limită (181') și (181'') se utilizează metoda imaginilor înlocuind sonda printr-o serie de surse de intensitate $q d\alpha$ plasate de-a lungul axei sondei ω la distanța α (fig. 38). Potențialul fiecărei surse e redat de funcția ce satisface ecuația (180).

$$d\Phi = \frac{q d\alpha}{\sqrt{\rho^2 + (\omega - \alpha)^2}} \quad (182)$$

Folosind metoda imaginilor menționată anterior pentru sursele plasate la distanțe $\pm n \pm \alpha$, (n fiind cuprins între 0 și ∞) s-a ajuns prin integrare dela $\alpha=0$ la $\alpha=x=\frac{b}{2h}$ la următoarea

expresie a potențialului pentru valori mari a lui ρ :

$$\Phi = 4q \left[\frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} K_0(2\pi n \rho) \cos 2n\pi \omega \times \right. \\ \left. \times \sin 2n\pi x + x \ln \frac{2}{\rho} \right] \quad (183)$$

în care K_0 este o funcție Bessell de specia treia de ordinul zero.

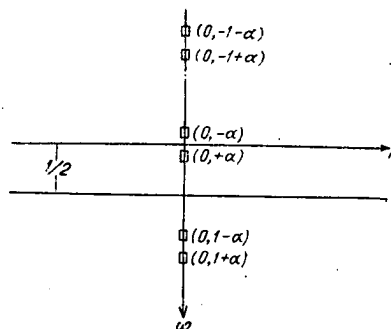


Fig. 38. Distribuția surselor de-a lungul coloanei.

Un exemplu al distribuției potențialului este arătat în fig. 39 pentru cazul unei sonde ce a străpuns 50% din grosimea h a stratului, în care $h = \frac{1}{4} r_d$, iar $r_s = \frac{1}{500} h$. Creș-

terile potențialului către sondă sînt raportate la creșterea totală a potențialului și se notează cu R pentru o sondă imperfectă și cu R' pentru o sondă perfectă.

Se observă că liniile echipotențiale pentru o sondă imperfectă din punctul de vedere al gradului de deschidere, devin foarte apropiate de cele ale unei sonde perfecte, în cazul unei curgeri radial-plane, la o distanță de sondă egală cu de două ori grosimea stratului productiv $\rho = 1$ sau $r = 2h$.

Această transformare a distribuției potențialului are loc cu atît mai repede cu cît grosimea străpunsă de sondă este mai mare

cu atât mai încet cu cât grosimea pe care sonda a străpuns stratul este mai mică.

Pentru cazul extrem când sonda a atins numai stratul productiv fără a pătrunde în el, distribuția potențialului are aspectul din figura 40. Se observă că liniile echipotențiale în apropierea sondei sînt asemănătoare cu cele ce se obțin în cazul unei curgeri radial-sferice. La o distanță anumită de sondă curbele de egal potențial tind să capete aspectul dintr-o curgere radial-plană, deși aceasta are loc mult mai încet decît în cazul unei străpungeri mai importante a stratului dacă se considera $\rho \sim 1$.

2. Debitul sondei. Pentru a determina debitul sondei care nu a străpuns complet zăcămintul, se ține seama de potențialul sondei Φ_s și că diferența de potențial $\Delta\Phi$ este:

$$\Delta\Phi = \frac{Q}{2\pi h} \left(-\frac{\Phi_s}{4 \sum q_m x_m} - \ln \frac{2}{r_d} \right) \quad (184)$$

Din această relație se revine la unitățile de lungime și se ajunge la debitul de forma:

$$Q = \frac{2\pi k h \Delta p / \mu}{\frac{1}{2h} \left[2 \ln \frac{4h}{r_s} - \ln \frac{\Gamma(0,875 h) \Gamma(0,125 h)}{\Gamma(1 - 0,875 h) \Gamma(1 - 0,125 h)} \right] - \ln \frac{4h}{r_d}} \quad (185)$$

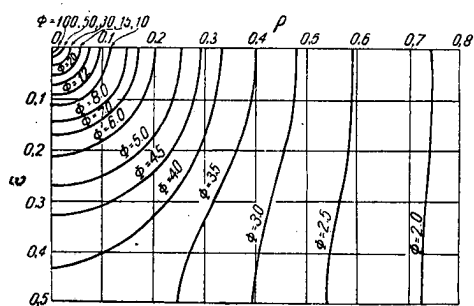


Fig. 40. Distribuția potențialului în cazul unei sonde ce a atins coperișul stratului productiv.

în care: \bar{h} reprezintă raportul dintre adîncimea străpunsă de sondă și grosimea stratului;

k — permeabilitatea;

μ — viscozitatea lichidului.

Kozeny a dat o formulă mult mai simplă, cu care se obțin aceleași valori ale debitului:

$$Q = \frac{2\pi k h \bar{h} \Delta p / \mu}{\ln r_d / r_s} \left[1 + 7 \sqrt{\frac{r_s}{2h\bar{h}} \cos \frac{\pi \bar{h}}{2}} \right] \quad (186)$$

Această ecuație a fost verificată și s-a constatat că pentru grosimi de strat mai mari de 22 m erorile sînt mai mici de 3–4% și deci se poate utiliza cu succes în practică.

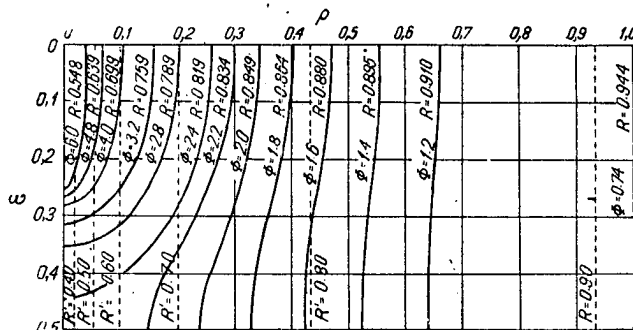


Fig. 39. Distribuția potențialului în cazul unei sonde ce a străpuns 50% dintr-un strat de grosime $h = 37,5$ m ($r_s = 7,5$ cm, $r_d = 150$ m). liniile punctate r' corespund cu o curgere radial-plană în cazul unei străpungeri totale a stratului. Unitatea de distanță $\rho = 2h$

Pentru a se putea trage concluziile asupra debitului s-au trasat următoarele diagrame, pe care se pot observa:

— Diagrama fig. 41 reprezintă — debitul unei sonde imperfecte din punct de vedere al gradului de deschidere, în funcție de gradul de străpungeri al sondei, \bar{h} în %, pentru diverse grosimi de strat (15–60 m).

Curbele reprezintă ecuația (185), iar liniile drepte curbele după ecuația (92) pentru $b=h$. Se vede din diagramă că aproximarea unei curgeri ca fiind strict o însumare a unei curgeri radial-plane și radial-sferice duce la erori foarte mari (la o străpungeri de 20% erorile sînt de 50%).

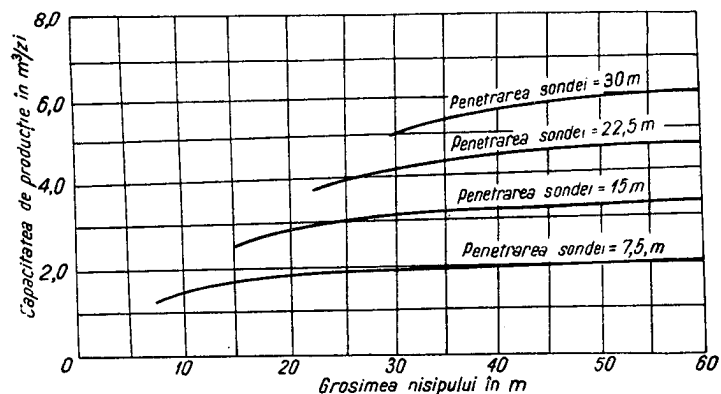
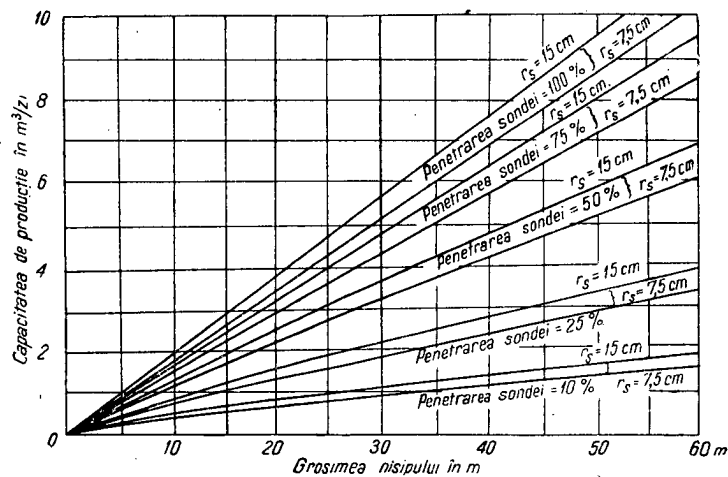
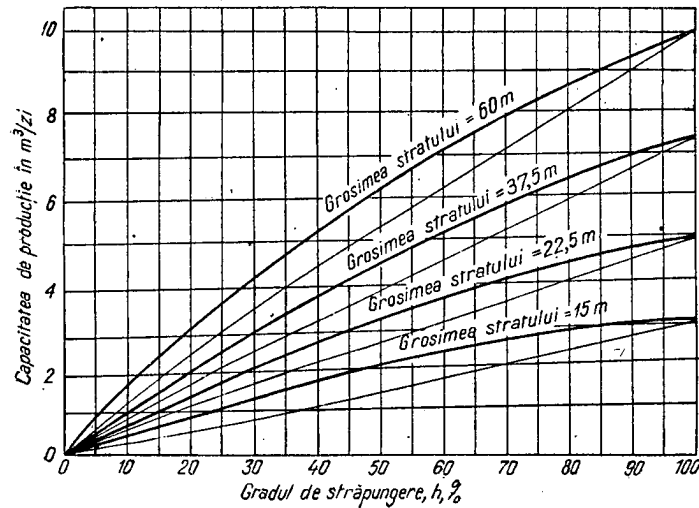
— Diagrama fig. 42 reprezintă variația debitului unei sonde în raport cu grosimea stratului, pentru diverse penetrări \bar{h} ale sondei în strat și pentru diverse raze de sondă r_s (7,5–15 cm).

Se observă din această diagramă că: la grosimi ale stratului mai mari ca 15 m, variația debitului cu grosimea h a acestuia este liniară, chiar pentru sonde imperfecte din punct de vedere al gradului de deschidere. Aceasta permite executarea corectă a extrapolării efectelor fără a face erori.

— Diagrama fig. 43 reprezintă creșterea debitului în raport cu grosimea stratului pentru diverse străpungeri. În această diagramă diferența totală de potențial este considerată egală cu unitatea, raza sondei $r_s = 7,5$ m și raza conturului de alimentare $r_d = 150$ m.

Mărirea grosimii h duce la creșteri din ce în ce mai mici ale debitului Q . Astfel, pentru o străpungeri de 7,5 m, creșterea grosimii

84



stratului de la 37,5 m la 60 m corespunde cu o mărire a debitului de cca 2%, în timp ce creșterea de la 7,5 m la 30 m duce la o mărire a debitului cu cca 50%.

b) Sondă ce străpunge parțial un strat productiv anizotrop. În acest caz permeabilitatea pe orizontală k_0 este diferită de permeabilitatea pe verticală k_z . Acest lucru se întâmplă foarte curent și anume ca valoarea lui k_z să fie mult mai mică decât valoarea lui k_0 .

Pentru aceasta, se utilizează funcția expresia potențialului

$$\Phi = \frac{1}{\mu} (p - \rho g z) \quad (187)$$

iar ecuația ce trebuie să fie satisfăcută de potențialul Φ este

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0. \quad (188)$$

Ecuația (188) se poate reduce prin schimbarea variabilelor

$$r = r' \sqrt{\frac{k_0}{k_z}}; \quad z = z' \quad (189)$$

$$\text{sau } r = r' \text{ și } z = z' \sqrt{\frac{k_z}{k_0}}$$

la o aceeași ecuație ca la un strat izotrop. Variațiile adimensionale sînt (v. fig. 44)

$$\rho' = \frac{r'}{2h'}; \quad \omega' = \frac{z'}{2h'}; \quad x' = \frac{b'}{2h'} = \frac{b}{2h} = x$$

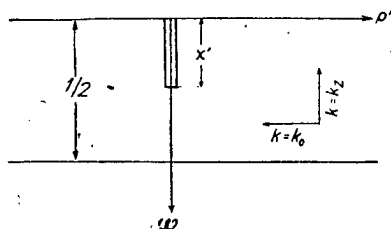


Fig. 44. O sondă care străpunge parțial un strat productiv anizotrop.

în care h' este grosimea stratului;

b' — adâncimea pe care a fost străpuns stratul.

Introducându-se următoarele condiții limită:

— culcușul și coperișul stratului sînt impermeabile viteza de curgere este nulă.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \omega'} = 0 \text{ la } \omega' = 0 \text{ și } \omega' = \frac{1}{2} \quad (190)$$

— potențialul este constant la conturul sondei

$$\Phi = \text{const la } \rho'_{\omega} = \sqrt{\frac{k_z}{k_0}} \rho_{\omega} \quad (190')$$

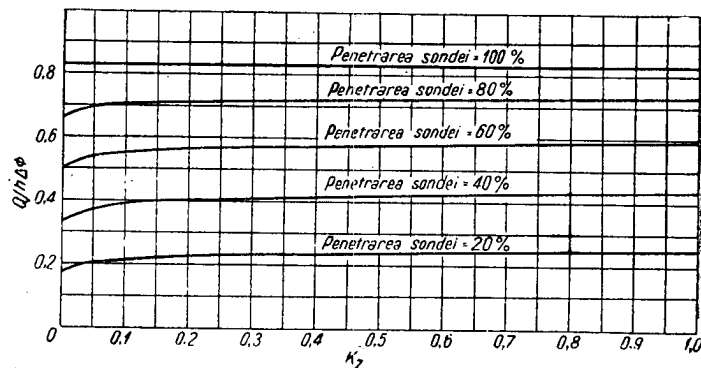


Fig. 45. Variația debitului pentru o sondă ce a străpuns parțial un strat în funcție de variația permeabilității (k_z) pe verticală (grosimea stratului $h = 37,5$ m; $r_s = 7,5$ cm; $r_d = 150$ m; $k_0 = 1$ D, $\mu = 1$ cP).

Potențialul este constant la conturul de alimentare:

$$\Phi = \text{const la } \rho'_d = \sqrt{\frac{k_z}{k_0}} \rho_d \quad (190'')$$

se obține distribuția potențialului și debitul.

Distribuția potențialului pentru variabilele (ω' , ρ') corespund cu cele ale unui strat izotrop pentru același raport de pătrundere, în care raza sondei și raza conturului se corectează cu $\sqrt{k_z}$.

În fig. 45 este redată variația raportului $Q/h\Delta\phi$ în funcție de k_z pentru diverse valori procentuale ale penetrării sondei.

Se vede că:

pentru $k_z = 1$ — rezultatul este identic cu acela obținut pentru un strat izotrop.

pentru $k_z = 0$ — rezultatul este același ca în cazul unei curgeri radial-plane, corespunzător grosimii b' pe care stratul a fost străpuns.

Aceste rezultate s-au obținut pentru cazul unui strat de grosime $h = 37,5$, cu o rază $r_d = 200$ m, raza sondei $r_s = 7,5$ m, permeabilitatea orizontală $k_0 = 1$ și viscozitatea lichidului $\mu = 1$.

Făcînd raportul debitelor în cele două cazuri extreme,

$$\frac{Q(k_z = 1)}{Q(k_0 = 0)}$$

se obține în fig. 46 variația acestui raport cu penetrarea sondei, pentru aceleași condiții ca în fig. 45. Din diagramă se vede că efectul

curgerii pe direcția verticală este considerabilă al străpungeri mici ale stratului. Astfel la o

fiecare șir de perforaturi reprezintă un caz asemănător cu sondele ce au atins stratul

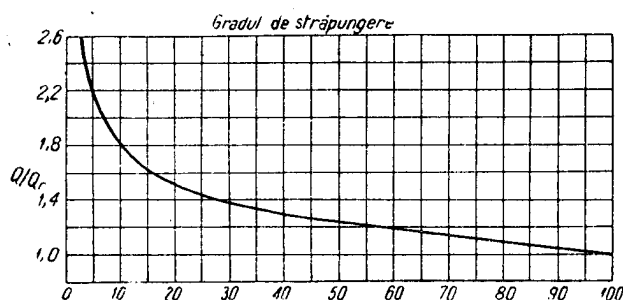


Fig. 46. Raportul debitelor Q/Q_r (Q_r — debitul curgerii radial-plane simetrice) în funcție de penetrarea sondei ($h = 37,5$ m, $r_s = 7,5$ cm; $r_d = 150$ m).

străpungere de 20%, o curgere strict radială crește cu 50%, pentru o permeabilitate verticală egală cu permeabilitatea orizontală, iar pentru o străpungere de 10% creșterea debitului este de 75%.

Creșterea lui Q se vede că nu este proporțională cu k_z , după cum reiese din fig. 45. Pe baza acestor rezultate se poate trage următoarea concluzie:

Cîtă vreme k_z nu este prea mic, nu este absolut necesară determinarea prea exactă a valorii lui k_z .

Pe de altă parte, dacă valoarea lui k_z reprezintă o valoare foarte mică ($k_z < 0,1 k_h$) atunci pentru a evita erori în calculul debitului, aceasta trebuie neapărat luată în considerație.

2. Imperfecțiunea sondelor din punctul de vedere al modului de deschidere. Acest caz de imperfecțiune a sondelor este întâlnit la

majoritatea sondelor, exceptînd acele sonde, care fiind săpate în formații dure și bine consolidate, nu mai sînt tubate în dreptul stratului productiv.

a) Cazul coloanelor tubate și perforate cu perforaturi circulare. Pentru aceasta s-a presupus că perforaturile sînt distribuite pe coloană, de-a lungul unei spirale, formînd m șiruri verticale de perforaturi. Distanța între șiruri este $2\pi/m$, iar raza perforaturii r_p și distanța între două perforaturi a .

Fig. 47. Schema unei coloane perforate cu perforaturi circulare dispune de-a lungul unei spirale.

Considerînd debitul de fluid ce intră prin fiecare perforatură, se poate presupune că

productiv. Prin această analiză s-a putut determina distribuția presiunii p_i , la care se asociază presiunea p_s ce lucrează la sondă. Pe aceste considerente s-a constatat că pentru o distanță mică între perforaturi nu prezintă importanță nici forma rețelei de perforaturi, nici poziția acestora între două șiruri învecinate. Ecuația debitului unei sonde imperfecte din punctul de vedere al modului de deschidere este:

$$Q = \frac{2\pi kh(p_d - p_s)}{c + \ln r_d/r_s} \quad (191)$$

iar expresia raportului dintre debitul Q al unei sonde imperfecte, față de debitul Q_0 al unei sonde perfecte este dată de ecuația

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\ln r_d/r_s}{c + \ln r_d/r_s} \quad (192)$$

în care

$$mC = 2\sum K_0(2n\pi\rho_p) + 2\sum_i \sum_n K_0\left(4n\pi\rho_s \sin \frac{\theta_i}{2}\right) \cos \frac{2n\pi i}{m} + \ln \frac{\rho_s}{\rho_p} - \sum_{i=1}^{m-1} \ln 2 \sin \frac{\theta_i}{2} \quad (193)$$

în care

$$\rho_p = \frac{r_p}{a}$$

$$\rho_s = \frac{r_s}{a}$$

θ_i = unghiul pînă la șirul i

K_0 = funcția Hankel de ordinul zero.

Din diagramele trasate pe baza ecuației (192) se pot observa următoarele:

— În diagrama fig. 48 se vede reprezentat raportul Q/Q_0 în funcție de produsul dintre densitatea și diametrul perforaturilor (q_0 reprezintă debitul unei sonde perfecte hidrodynamic).

Se pot deduce astfel următoarele:

— Debitul nu depinde de modul de așezare a perforaturilor, ci de diametrul și numărul (densitatea) perforaturilor.

— Dimensiunea coloanei perforate nu joacă practic nici un rol, diferențele între coloana de 3" (curba continuă) și coloana de 6" (curba punctată) sînt practic insensibile.

— Creșterile debitului sînt importante cînd produsul (diametre) \times (număr perforaturi) are

valori mici, dar pe măsură ce acest produs crește, mărirea debitului devine din ce în ce

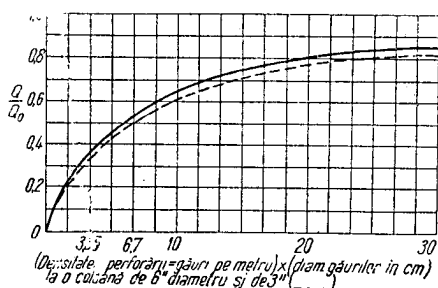


Fig. 48. Efectul perforaturilor asupra raportului debitelor q/q_0 (q_0 — debitul sondei perfecte hidrodinamic). Curba continuă pentru coloana de 3", curba punctată pentru coloana de 6".

mai insensibilă. Prin urmare, pentru mărirea debitului sînt două soluții:

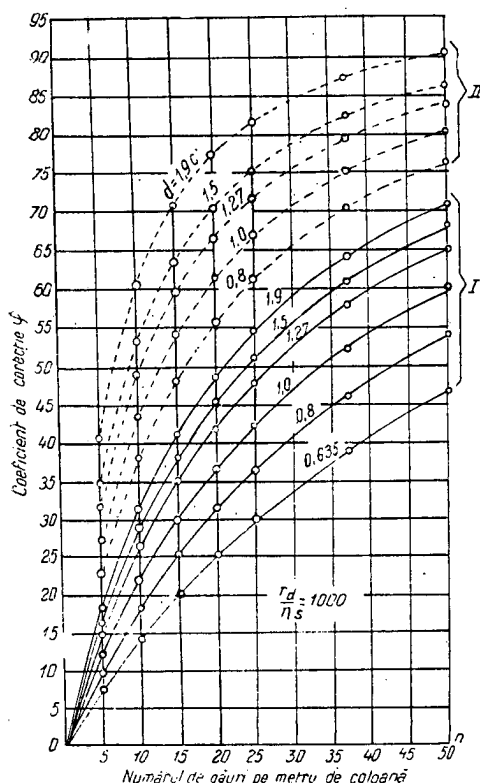


Fig. 49. Influența perforaturilor asupra coeficientului de corecție φ (II — curbele după Muskat, I — curbele după Sciurov).

— mărirea diametrului perforaturii (diametrul în cm);

— mărirea densității de perforare (găuri pe metru) pînă cînd produsul lor va reprezenta

cca 10 sau 15. Pentru rezistența coloanei este mai recomandabil, în vederea mării debitului, să se mărească densitatea perforaturilor decît a diametrului acestora.

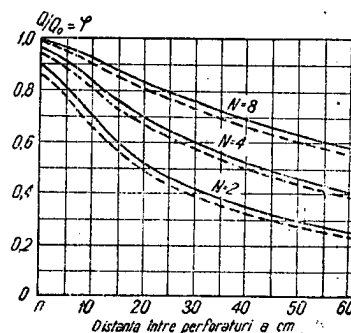


Fig. 50. Variația lui φ în funcție de distanța între perforaturi (raza perforaturii = 0,63 cm; curbele continue $r_s = 7,5$ cm; curbele punctate $r_s = 15$ cm; N reprezintă numărul de șiruri verticale de perforaturi).

Sciurov a completat studiul cu soluții mai exacte pentru o serie de probleme. Se notează cu φ factorul de corecție

$$Q = Q_0 \varphi \quad (194)$$

în care φ a fost determinat într-o serie de diagrame pentru diverse situații. Sciurov a

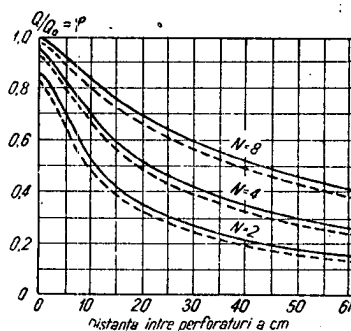


Fig. 51. Variația lui φ în funcție de distanța între perforaturi (raza perforaturii = 0,32 cm; curbele continue $r_s = 7,5$ cm; curbele punctate $r_s = 15$ cm; N reprezintă numărul de șiruri verticale de perforaturi).

găsit prin experiențe făcute pe modelele electrice aceeași concluzie: coeficientul φ rămîne constant dacă proporțional cu mărirea razei perforaturilor se micșorează tot de atîtea ori numărul perforaturilor pe metru.

Calcule exacte au permis obținerea coeficientului φ din diagrama fig. 49 pentru raportul $r_d/r_s = 1000$, în funcție de diametrul coloanei și numărul de perforaturi pe metru (curbele I — Sciurov; curbele II — Muskat).

În diagramele fig. 50 și fig. 51 sînt date valorile coeficientului φ în funcție de dis-

tanța între perforaturi și densitatea perforaturilor, N .

În fig. 50 raza perforaturii este $r_0 = 0,63$ cm, iar în fig. 51 raza perforaturii este $r_0 = 0,32$ cm. Se vede de aci că factorul de corecție φ are valori mai mari (deci debite mai mari) în cazul diametrului mai mare al perforaturii.

— În diagrama fig. 52 este trecut raportul Q/Q_0 în funcție de numărul găurilor pe metru.

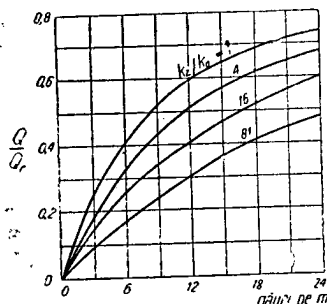


Fig. 52. Efectul perforaturilor asupra debitului în cazul unui strat anizotrop (q_0 — debitul unei sonde perfecte hidrocinamic; $r_s = 3''$; raza perforaturii 7,5 cm).

pentru cazul unui strat productiv anizotrop, în care raza sondei $r_s = 7,5$ și raza perforaturii $r_p = 8,35$ mm.

Această diagramă s-a trasat păstrînd aceeași ecuație (192) în care s-a înlocuit mC prin expresia:

$$mC = 2 \sum_{i=1}^{\infty} K_0 \left(\frac{2n\pi r_p}{\alpha \sqrt{\alpha}} \right) + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} K_0 \left(\frac{4n\pi r_s}{\alpha} \sin \theta_i/2 \right) + \ln \frac{r_s}{r_p} - \sum_{i=1}^{m-1} \ln 2 \sin \frac{\theta_i}{2} \quad (195)$$

în care

$$\rho_s = \frac{r_s}{\alpha a}; \quad \rho_p = \frac{r_p}{\alpha a} \quad \text{și} \quad \alpha = \sqrt{\frac{k_0}{k_z}} \quad (196)$$

iar K_0 — funcția Hankel.

Se observă din diagrama fig. 54 că efectul anizotropiei stratului nu este mare decît dacă permeabilitatea pe orizontală este foarte mică față de permeabilitatea pe verticală.

b) Cazul coloanelor cu fante (găuri). Problema acestora a fost rezolvată echivalînd suprafața fantelor cu niște fante continue distribuite simetric, obținînd astfel o curgere radial-plană.

S-a obținut astfel aceeași ecuație (191) pentru debitul sondei

$$Q = \frac{2\pi kh(p_d - p_s)}{C + \ln r_d/r_s}$$

cu deosebirea că în această ecuație, pentru valoarea lui C funcția Hankel e înlocuită cu factorul $(\sin 2n\pi h)/2n\pi h$ în care h este jumătate din lungimea fantei și ρ_p este jumătate din lățimea.

S-a obținut astfel expresia lui C într-o formă foarte simplă

$$C = \frac{2}{m} \ln \frac{2}{\pi \Omega} \quad (197)$$

în care m este numărul de șiruri de fante, Ω fracția de suprafață deschisă din suprafața totală a coloanei.

Pe baza ecuațiilor (197) și (191) s-a trasat o diagramă în fig. 53 în care s-a examinat raportul debitelor Q/Q_0 față de suprafața Ω deschisă din buran, pentru m șiruri de fante. Teoretic fantele oferă o reducere foarte mică

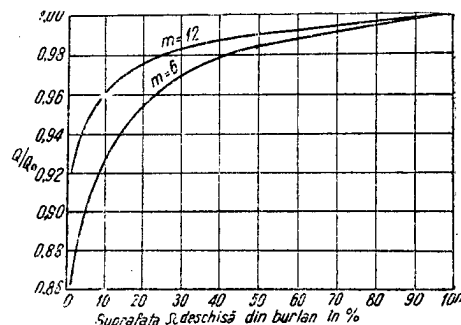


Fig. 53. Efectul fantelor asupra debitului (q_0 — debitul unei sonde perfecte hidrocinamic; m — numărul șirurilor de fante; $r_d/r_s = 2640$).

a debitului, reduceri mai importante obținîndu-se la o valoare a lui $\Omega < 5\%$. De asemenea modificarea numărului m de șiruri de fante nu duc la mărimi sau scăderi prea importante de debit.

E. ANALIZA CURGERII FLUIDELOR OMOGENE ȘI COMPRESIBILE

a. Curgerea lichidelor compresibile prin medii poroase

1. Noțiuni de bază. Într-un zăcămint petrolifer atît apa cît și țiteiul sînt compresibile, și anume țiteiul cu gaze în soluție este de 5—6 ori mai compresibil ca apa. S-a pus problema dacă în cazul lichidelor compresibile se pot utiliza aceleași legi ce s-au utilizat pentru lichidele incompresibile.

O asemenea ipoteză ar presupune din punct de vedere fizic următoarele:

a) o viteză infinită de propagare a turbulențelor ce au loc în masa de fluid ce curge în mediul poros;

b) variațiile de masă ale fluidului să fie mici, în comparație cu cele din cazul curgerii staționare unde variațiile de masă sînt nule.

În legătură cu condiția a), este de observat că viteza de propagare a turburărilor în mediul elastic este

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (198)$$

în care E este modulul de elasticitate și ρ masa specifică. Întrucât masa specifică are în general valoarea $\rho = 100 \frac{\text{kgs}^2}{\text{m}^4}$ pentru o viteză infinită ar fi necesar ca și valoarea modulului E să fie tot infinită.

Compresibilitatea măsurată în laborator este de ordinul $10^{-4}/\text{at}$ până la $10^{-5}/\text{at}$, încât viteza de propagare are o mărime finită.

Întrucât în problema de față ceea ce interesează este viteza relativă de propagare, se poate compara aceasta cu viteza de curgere a lichidului în mediul poros. Astfel: viteza de propagare a turburărilor $v \cong 10^5 \text{ cm/s}$ și viteza de curgere a lichidului $v \cong 1 \text{ cm/s}$. Ținând seama de raportul acestor două viteze se poate admite problema curgerii staționare ca o succesiune continuă de curgeri staționare.

2. Ecuatiile curgerii lichidelor compresibile prin medii poroase. Ecuatia de bază a curgerii lichidelor omogene și compresibile este ecuația (68), restrinsă sub forma

$$a \nabla^2 p = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (199)$$

în care a depinde de caracteristicile stratului și lichidului cu care este saturat stratul și este adesea denumit coeficient de piezoconductibilitate (v. și Cap. VI B.C.). Acest coeficient caracterizează procesul de redistribuire a presiunii în zăcămint și ritmul de variație al presiunii.

$$a = \frac{k}{m\beta\mu} \quad (200)$$

În sistemul mixt a are dimensiunile cm^2/s .

Masa specifică ρ din legea de stare este exprimată prin relația

$$\rho = \rho_0 e^{\beta p} \quad (201)$$

în care ρ_0 este masa specifică la presiunea atmosferică. Ecuatia lui Darcy se poate scrie

$$\rho \bar{v} = - \frac{k}{\mu} \rho \nabla p = - \frac{k}{\mu \beta} \nabla p = - a m \nabla p \quad (202)$$

sau de aci se poate scrie

$$\nabla p = \frac{\Delta p}{\rho \beta} \quad (203)$$

În ecuația (199) se poate exprima timpul t^* adimensional în forma

$$\bar{t} = \frac{at}{r_c^2} = \frac{kt}{m\beta\mu r_c^2} \quad (204)$$

în care r_c este mărimea sistemului.

*) \bar{t} se găsește în literatură ca parametrul lui Fourier notat și cu F_0 .

a) Condițiile în care se ține seama de compresibilitate în exploatarea unui zăcămint de țiței. 1) Se consideră un zăcămint ca în figura 54 în care masa inițială de apă conținută în zona de apă este

$$M = \pi h \rho_i (r_d^2 - r_c^2) m \quad (205)$$

în care ρ_i este masa specifică inițială a fluidului;
 r_d — raza exterioară a zonei de apă;
 r_c — raza interioară a zonei de apă (raza contactului apă-țiței).

Pentru grosimea unitară de strat, debitul staționar este:

$$Q = \frac{2\pi k \Delta p}{\mu \beta \ln r_d/r_c} \quad (206)$$

Valoarea masei ΔM de apă ce pătrunde în zona de țiței până la obținerea unei curgeri staționare [ca ecuația (206)]

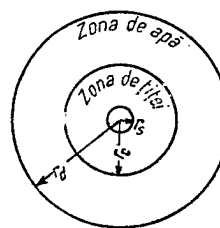


Fig. 54. Secțiune orizontală prin mediul poros.

$$\Delta M = \pi m (\rho_i - \rho_c) \left(\frac{r_d^2 - r_c^2}{2 \ln r_d/r_c} - r_c^2 \right) \quad (207)$$

Considerind pe $r_c \ll r_d$, se obține timpul cu care curgerea devine nestaționară,

$$t \sim \frac{\Delta M}{Q} \sim \frac{m\mu\beta r_d^2}{4k} = \frac{\pi m\beta r_c^2}{4\pi k/\mu} \quad (208)$$

— Pentru $m = 0,25$, $\mu = 1 \text{ cP}$, $\beta = 44 \cdot 10^{-6}/\text{at}$, $r_c = 10^5 \text{ cm}$ (1 km), $k = 0,2$ Darcy se obține din ecuația (208) un timp $t \cong 35$ ore.

— Pentru aceleași date, însă $r_d = 20 \text{ km}$, se obține tot din ecuația (208) un timp $t \cong 18$ luni.

Concluzii. Curgerea se poate considera staționară dacă coeficientul de compresibilitate β are valori moderate și dacă dimensiunile zăcămintului $\pi r_d^2 m$ sînt reduse.

Curgerea trebuie considerată nestaționară (întrucît durata fenomenului tranzitoriu este mare), dacă dimensiunile zăcămintului sînt mari. Perioada tranzitorie se scurtează dacă permeabilitatea este mică.

2) Presupunind că presiunea variază în timp $\left(\frac{dp}{dt}\right)$, odată cu variația presiunii se va modifica și masa specifică a lichidului. Pe unitate de grosime de strat variația masei (dacă $r_c \ll r_d$) este:

$$\frac{dM}{dt} = \pi r_d^2 m \beta \bar{p} \frac{dp}{dt} \quad (209)$$

În cazul unui debit staționar ecuația (206) se obține un raport:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{m\mu \bar{\rho} r_d^2 \ln r_d/r_c}{2k \Delta p} \frac{dp}{dt} \quad (210)$$

în care $\frac{dp}{dt}$ reprezintă viteza variației presiunii de contur corespunzătoare vitezei de variație a masei specifice:

Întrucît în ecuația (210), $r_d/r_c = 10$, $\Delta p = 0,001$, $\frac{dp}{dt} = 0,1$ at/zi și restul constantelor aceleași ca cele aplicate în ecuația (208), se obține:

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} \sim 0,05 & \text{pentru } r_c = 1 \text{ km} \\ \sim 10 & \text{pentru } r_c = 20 \text{ km.} \end{cases}$$

Concluzii. La dimensiuni mici, schimbarea conținutului de masă este practic neglijabilă, deci fenomenul poate fi considerat practic ca fiind staționar.

La dimensiuni mari însă, variația conținutului de masă este de zeci de ori mai mare decît debitul ce s-ar fi produs în condiții staționare. Tratarea unei asemenea curgeri drept o curgere staționară duce la erori foarte mari.

3. Curgerea staționară a unui lichid compresibil. În acest caz, pornind de la ecuația (68) din capitolul II, pentru condiții staționare.

$$\Delta^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0$$

se vor analiza două tipuri de curgere: curgerea unidimensională și curgerea radial-plană.

a) **Curgerea unidimensională.** Se consideră un mediu poros ca în fig. 9, în care masa specifică are diferite valori între presiunea p_d la conturul de alimentare și presiunea p_s la sondele (infinît apropiate).

Astfel, la p_d , p și p_s corespund masele ρ_d , ρ și ρ_s de-a lungul parcursului L între contur și galeria de sonde.

1) **Distribuția masei specifice.** Pentru aflarea distribuției masei specifice se pleacă de la relația (202) și se obține:

$$\rho = \rho_d + \frac{\rho_d - \rho_s}{L} x \quad (211)$$

Se vede că ecuația obținută (211), coincide cu ecuația (75) cu deosebirea că în locul presiunii p , aici apare ecuația masei specifice ρ .

2) **Distribuția presiunii.** Combinînd ecuația (211) cu ecuația (201) se obține valoarea presiunii

$$p = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{e^{\beta p_d} - e^{\beta p_s}}{L} x + e^{\beta p_s} \right] \quad (212)$$

3) **Ecuația debitului de masă** se determină pe baza vitezei din ecuația (202) înmulțită cu suprafața F , încît:

$$Q_M = -F \cdot \rho \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = -F \frac{k}{\mu \beta} \frac{\partial \rho}{\partial x} = F \frac{k}{\mu \beta} \cdot \frac{\rho_d - \rho_s}{L} \quad (213)$$

Introducînd în ecuația (213) relația (201) și desfășcînd în serie rezultă,

$$Q = Q_0 (1 + \beta \bar{p})$$

în care:

$$\bar{p} = \frac{p_d + p_s}{2} \quad (214)$$

iar Q_0 este debitul volumetric obținut pentru curgerea unidimensională a fluidelor incompresibile în ecuația (73).

Se vede din ecuația (213) că debitul în cazul unui lichid compresibil este mai mare decît cel din cazul unui lichid incompresibil cu factorul $\beta \bar{p}$.

b) **Curgerea radial-plană.** În cazul unei curgeri radial-plane a unui lichid compresibil, ca în fig. 55, se consideră un contur circular de rază r_d , iar în centrul conturului este săpată o sondă de rază r_s .

La conturul de alimentare de rază r_d există o presiune p_d și o masă specifică corespunzătoare ρ_d , iar la sonda de rază r_s există o presiune p_s și o masă specifică ρ_s .

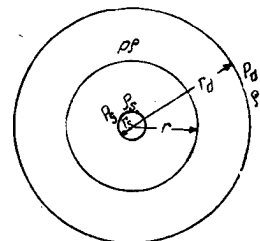


Fig. 55. Curgere radial-plană.

Viteza, conform ecuației (202), este:

$$\rho v = \frac{k}{\mu} \rho \frac{\partial p}{\partial r} \quad (215)$$

și ținînd seama de ecuația (68), se obține următoarele:

1) **Distribuția masei specifice.** Valoarea masei specifice ρ corespunzătoare unei distanțe r de la centrul conturului este:

$$\rho = \rho_s + \frac{\rho_d - \rho_s}{\ln r_d/r_s} \cdot \ln r/r_s \quad (216)$$

Această ecuație coincide cu ecuația (90) în care însă în locul presiunii p , apare masa specifică ρ .

2) **Distribuția presiunii.** Distribuția presiunii în cazul unei curgeri radial-plane se poate obține înlocuind în ecuația (216) valoarea lui ρ cu cea din ecuația (201).

$$p = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{(e^{\beta p_d} - e^{\beta p_s}) \ln r/r_s}{\ln r_d/r_s} + e^{\beta p_s} \right] \quad (217)$$

în care p este presiunea corespunzătoare distanței r de la centrul conturului.

3) Ecuația debitului. Debitul de masă se obține înlocuind viteza și făcând toate transformările

$$Q = \frac{2\pi k(p_d - p_s)}{\beta \mu \ln \frac{r_c}{r_s}} \quad (218)$$

iar debitul volumetric $Q = Q_0(1 + \beta \bar{p})$

în care Q_0 este debitul obținut în ecuația (92) pentru curgerea radial-plană a unui lichid incompresibil, iar \bar{p} este presiunea medie aritmetică,

$$\bar{p} = \frac{p_d + p_s}{2}$$

Observație. Coeficientul de compresibilitate β după V. N. Scelkacev trebuie să cuprindă nu numai compresibilitatea lichidului, ci și valoarea compresibilității mediului poros. Roca a fost într-adevăr comprimată la presiuni mari și prin destinderea acesteia are loc de asemenea o expulzare a unui volum de țigăi.

Astfel

$$\beta^* = m_l^2 \beta_l + \beta_s$$

în care:

- β^* este coeficientul de compresibilitate general (al ansamblului rocă + fluid);
- m — porozitatea;
- β_l — coeficientul de compresibilitate al lichidului;
- β_s — coeficientul de compresibilitate al roci-colector.

4. Curgerea radială nestaționară a unui lichid compresibil. Pentru simplificarea problemei se consideră un zăcămint ca în condițiile fig. 55, în care o zonă circulară de țigăi este înconjurată de o zonă circulară de apă.

Ecuația de bază este ecuația (199) exprimată în coordonate cilindrice care pe baza simetriei radiale se poate scrie:

$$\frac{a}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (219)$$

În studiul curgerii nestaționare, problemele se împart în două cazuri:

- cazul apei de sinclinal infinite,
- cazul apei de sinclinal finite.

a) Cazul apei de sinclinal infinite. Această situație are loc cînd zona de apă este atît de mare, încît practic se poate termina exploatarea zonei de țigăi înainte ca turburările ce se produc prin exploatarea acesteia să se fi transmis la limitele zonei de apă.

Cazul apei de sinclinal infinite a fost examinat în două ipoteze:

- exploatarea la un debit constant;
- exploatarea la o cădere de presiune constantă (prescrisă).

1) Exploatarea la un debit constant. Condițiile limită în acest caz sînt:

— la timpul $t = 0$, (condiții inițiale) presiunea și masa specifică sînt constante în tot zăcămintul

$$\left. \begin{aligned} p &= p_i \\ p &= p_i \end{aligned} \right\} \text{ la } t = 0$$

— La contactul apă țigăi, $r = 1$ este valabil la orice moment relația

$$\left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=1} = -1$$

— căderea de presiune cumulativă Δp este proporțională cu căderea de presiune pe unitate de debit.

$$\Delta p = c \cdot p(r, t).$$

Pornind de la relația debitului la raza $r = 1$

$$\begin{aligned} q(t) &= -\frac{2\pi k}{\mu} \left(\frac{\partial \Delta p}{\partial r} \right)_{r=1} = \\ &= \frac{2\pi k c}{\mu} \left(\frac{\partial p(r_0 t)}{\partial r} \right)_{r=1} \end{aligned} \quad (220)$$

în care la $r = 1$, (la contactul apă-țigăi) se obține o cădere de presiune

$$\Delta p = \frac{q(t) \mu}{2\pi k} p(i). \quad (221)$$

Pentru $\bar{t} < 100$

Funcția $p(i)$ se obține din ecuația,

$$p(i) = \frac{4}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{(1 - e^{-z^2 i}) dz}{z^3 [J_1^2(z) + Y_1^2(z)]} \quad (222)$$

în care:

$$\bar{t} \text{ este obținut din relația (204) } \bar{t} = \frac{at}{r_c^2}$$

iar J_1 și Y_1 sînt funcții Bessel de specia întâia

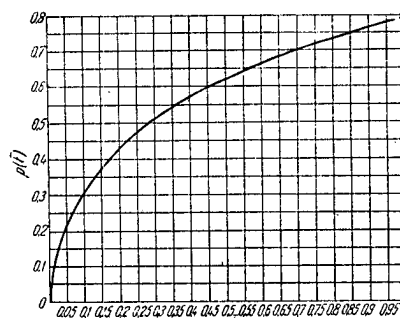


Fig. 56. Funcțiunea $p(i)$ pentru un zăcămint mărginit de o apă de sinclinal de întindere infinită și exploatat la debit constant (i), cuprins între 0 și 1.

și a doua și de ordinul unu. Această funcție a fost tabulată pentru valorile necesare calculului.

În diagramele fig. 56, 57 și 58 este reprezentată relația $p(i)$ față de (i). Curba din fig. 58 este

reprezentată în fig. 57, și fig. 56 pentru limite mai mici ale lui \bar{t} .

În fig. 59 este reprezentată o curbă asemănătoare cu cea din fig. 56 și alături de aceasta

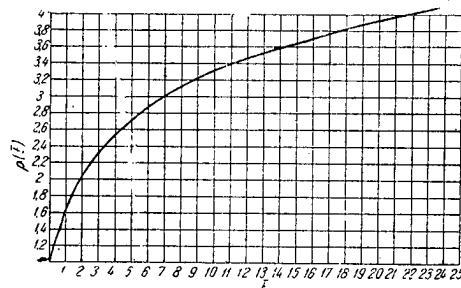


Fig. 57. Funcțiunea $p(\bar{t})$ pentru un zăcămintă mărginit de o apă de sinclinal de întindere infinită și exploatat la debit constant (\bar{t} , cuprins între 0 și 25).

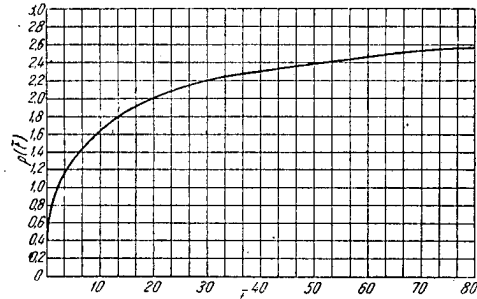


Fig. 58. Funcțiunea $p(\bar{t})$ pentru un zăcămintă mărginit de o apă de sinclinal de întindere infinită și exploatat la debit constant (\bar{t} , cuprins între 0 și 80).

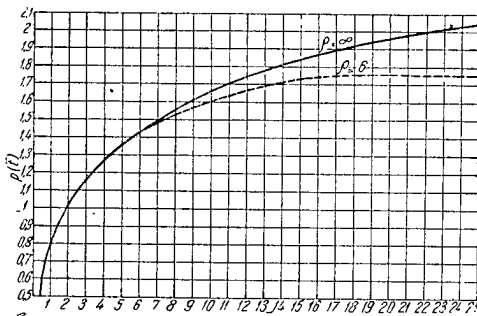


Fig. 59. Funcțiunea $p(\bar{t})$ în funcție de timpul adimensional \bar{t} ($p = \infty$ zăcămintă mărginit cu o zonă de apă de sinclinal infinită exploatat la debit constant; $p = 6$ zăcămintă cu apă finită cu presiune constantă pe conturul exterior și exploatat la debit constant).

variația $p(\bar{t})$ cu timpul dimensional (\bar{t}), pentru

un zăcămintă finit $\rho = \frac{r_d}{r_c} = 6$

Pentru $\bar{t} > 100$

funcția $p(\bar{t})$ se obține dintr-o ecuație mai simplă

$$p(\bar{t}) = \frac{1}{2} (\ln \bar{t} + 0,8091) \quad (223)$$

Pe baza diagramei obținute și pe baza ecuației (221) se pot face următoarele observații:

— Din ecuația (221) se vede că inițial căderea de presiune Δp crește cu \bar{t} și tinde asimptotic la o variație logaritmică cu t . Comparînd variația căderii de presiune cu variația din cazul ipotezei unei curgeri staționare, se vede că presiunea nu se stabilizează deși ritmul de creștere este din ce în ce mai mic.

— Curba obținută (linia întreagă) are un caracter universal pentru orice zăcămintă cu apă de sinclinal infinită.

Cu ajutorul diagramelor pe fig. 56 ÷ 59 modul de calcul al căderii de presiune în timp este următorul:

— Se introduc în ecuația (200) valorile ce caracterizează zăcămintă și se obține expresia lui a .

— Se introduce a în ecuația (204) și se determină legătura între timpul \bar{t} adimensional și timpul t dimensional.

— Se determină în funcție de \bar{t} pe fig. 56 ÷ 59 valorile corespunzătoare ale lui $p(\bar{t})$.

— Se introduce valoarea $p(\bar{t})$ găsită în ecuația (221) unde ceilalți termeni [inclusiv $q(\bar{t})$] sînt constanți și se găsește valoarea lui Δp corespunzătoare unui anumit timp t .

Observație. Unitățile întrebuițate sînt cele din sistemul mixt, utilizat în hidraulica subterană (v. tabela 1).

α) Legătura între căderea de presiune, coeficientul de extracție și debitul extras. Din ecuația (221) se vede că Δp este proporțional cu $q(t)$ și crește în timp ca funcțiunea $p(\bar{t})$, încît considerînd debitul constant \bar{q} ca fiind:

$$\bar{q} = \frac{q(t) \mu}{\pi k (1 - S_a)} \quad (224)$$

Factorul de recuperare este raportul dintre volumul extras în timpul t , și volumul inițial de fluid din zăcămintă.

$$\epsilon = \frac{\bar{q} \cdot t}{\pi r_c^2 m (1 - S_a)} \quad (225)$$

sau transformată, valoarea lui ϵ se poate scrie:

$$\epsilon = \frac{\bar{q} \cdot t}{\pi r_c^2 m (1 - S_a)} = \frac{kt}{m \beta \mu r_c^2} \times \frac{q(t) \mu}{\pi k (1 - S_a)} \beta = \bar{t} \cdot \bar{q} \cdot \beta \quad (226)$$

Reprezentarea grafică a acestor ecuații s-a făcut în fig. 60 și fig. 61. Se observă astfel în fig. 60 variația căderii de presiune Δp , în funcție de factorul de recuperare ϵ , pentru diverse valori ale debitului \bar{q} , iar în fig. 61 variația căderii de presiune în funcție de variația debitului la anumite valori ale factorului de recuperare ϵ .

*) Tabele de funcțiuni. Ianke și Emde Moscova Gosoptehizdat 1949.

β) Influența modificării debitului asupra căderii de presiune. Un zăcămint poate fi exploatat cu un debit constant până la un anumit timp, după care din diverse motive zăcă-

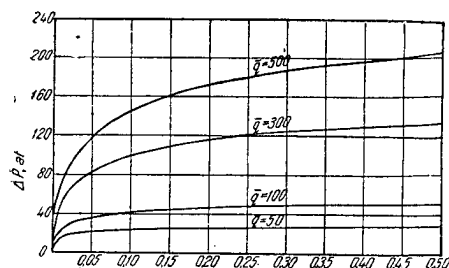


Fig. 60. Calculul căderii de presiune în funcție de factorul de recuperare δ (exprimat ca un procent din rezerva totală de țiței). Compresibilitatea apei se consideră $\beta a = 4,5 \cdot 10^{-5}$ at.

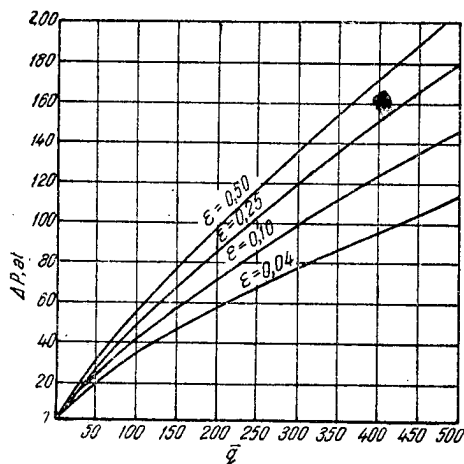


Fig. 61. Variația căderii de presiune în funcție de q pentru diverși factori de recuperare δ; (Compresibilitatea apei $\beta a = 4,5 \cdot 10^{-5}$ /at).

mintul este exploatat cu un debit constant de altă valoare.

Se consideră că un zăcămint a fost exploatat până la un timp t_1 cu un debit q_0 , la care corespunde o cădere de presiune

$$\Delta p_0 = \frac{q_0 \mu}{2 \pi k} p(\bar{t}) \quad (227)$$

La timpul t_1 debitul a crescut cu $q_1 - q_0$ atunci pe întreg timpul, căderea de presiune va fi datorită suprapunerii de efecte,

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{\mu}{2 \pi k} \left[q_0 p(\bar{t}) + (q_1 - q_0) p(\bar{t} - \bar{t}_1) \right] \\ \Delta p &= \frac{\mu q_0}{2 \pi k} \left[p(\bar{t}) + \left(\frac{q_1}{q_0} - 1 \right) p(\bar{t} - \bar{t}_1) \right] \\ \frac{2 \pi k \Delta p}{\mu q_0} &= p(\bar{t}) + (m - 1) p(\bar{t} - \bar{t}_1) \quad (228) \end{aligned}$$

în care: m este raportul debitelor q_1 (după timpul t_1) a și q_0 (înainte de timpul t_1).

În fig. 62 este reprezentată variația $p(\bar{t})$ față de \bar{t} din care se extrag următoarele:

— dacă $n > 1$ căderea de presiune crește într-un ritm mai accelerat la început, iar apoi creșterea în timp este mult mai lentă;

— dacă $n < 1$ atunci căderea de presiune atinge o valoare minimă și apoi începe din nou să crească, prelungind durata regimului elastic.

Observații. În practică se întâlnește deajuns de rar cazul când debitul de țiței extras rămâne constant în timpul producției; pe măsură ce noi sonde sînt săpate, producția curentă a zăcămintului crește și aceasta duce la o modificare sensibilă a căderii de presiune.

2) Exploatarea la o cădere de presiune constantă (prescrisă). Acest caz este legat de menținerea unei presiuni constante și de o cunoaștere a volumului de apă ce a intrat în zona de țiței. Condițiile ce se pun sînt:

— la timpul $t = 0$, presiunea este egală în toate punctele mediului poros și egală cu 1;

— după începerea exploatării, presiunea la contactul apă-țiței scade la zero și rămîne egală cu zero întreaga durată a exploatării.

În această situație producția cumulativă $Q(t)$ este

$$Q(t) = \int_0^t q(t) dt \quad (229)$$

în care $q(t)$ este debitul zilnic.

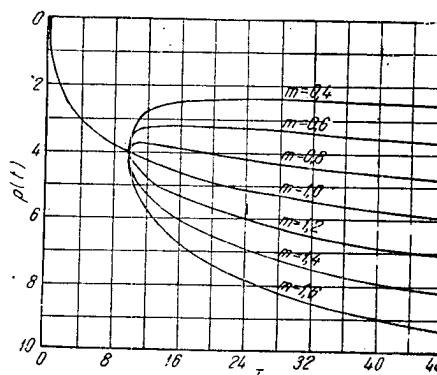


Fig. 62. Variația funcției $p(\bar{t})$ în raport cu timpul adimensional \bar{t} pentru diverse modificări ale debitului.

Ținînd seama de relațiile (221) și (204) se obține producție cumulativă la o diferență de presiune Δp :

$$\begin{aligned} Q(t) &= 2 \pi m \beta r_d^2 \Delta p \int_0^{\bar{t}} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=1} d\bar{t} = \\ &= 2 \pi m \beta r_d^2 \Delta p G(\bar{t}) \quad (230) \end{aligned}$$

Valoarea lui $G(\bar{t})$ se obține prin transformarea ecuației lui Laplace și pentru curgerea radial-plană, are expresia:

$$G(\bar{t}) = \frac{4}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{(1 - e^{-z^2 \bar{t}}) dz}{z^3 [J_0^2(z) + Y_0^2(z)]} \quad (231)$$

iar pentru curgerea liniară

$$G(\bar{t}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \bar{t}^{1/2}. \quad (232)$$

Valoarea cantității cumulative de apă $q(\bar{t})$ ce intră în zona de țigăi se determină prin introducerea valorii $G(\bar{t})$ din ecuația (230).

α) Influența modificării căderii de presiune asupra debitului.

α_1) Căderi discontinue de presiune. Un zăcămint poate fi exploatat un timp cu o cădere de presiune prescrisă care, din diferite considerente de producție, este apoi modificată (de ex. căderea de presiune este mărită prin introducerea în producție a unui nou grup de sonde).

În acest caz se aplică de asemenea teorema suprapunerii efectelor și anume:

— Volumul cumulativ de apă $Q(\bar{t})$ intrat în zona de țigăi pentru o diferență de presiune Δp_0 este, după ecuația (230)

$$Q_0(\bar{t}) = 2\pi m \beta r_d^2 \Delta p_0 G(\bar{t})$$

— Volumul cumulativ $Q_1(\bar{t})$ pentru timpul \bar{t}_1 , în care căderea de presiune este Δp_1 , va fi:

$$Q(\bar{t}) = 2\pi m \beta r_d^2 \Delta p_1 G(\bar{t} - \bar{t}_1)$$

deci, $Q(\bar{t})$ după o serie întreagă de sporiri ale căderii de presiune, va fi:

$$Q(\bar{t}) = 2\pi m \beta r_d^2 [\Delta p_0 G(\bar{t}) + \Delta p_1 G(\bar{t} - \bar{t}_1) + \Delta p_2 G(\bar{t} - \bar{t}_2) + \dots]$$

sau dacă au loc căderi infinitezimale de presiune debitul cumulativ

$$Q(\bar{t}) = 2\pi m \beta r_d^2 \int_0^{\bar{t}} \frac{\partial}{\partial \bar{t}'} \Delta p G(\bar{t} - \bar{t}') d\bar{t}' \quad (233)$$

În condițiile debitelor pe unitate de timp, valoarea $q(\bar{t})$ se obține ca în variația volumelor cumulative,

$$q(\bar{t}) = \frac{2\pi k}{\mu} \Delta p F(\bar{t}) \quad (233)$$

în care $F(\bar{t})$ este derivat în raport cu timpul funcțiunii ce reprezintă cantitatea cumulativă de apă ce intră în zăcămint,

$$F(\bar{t}) = \frac{dG(\bar{t})}{d\bar{t}} = \frac{4}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-z^2 \bar{t}}}{z [J_0^2(z) + Y_0^2(z)]} dz. \quad (234)$$

Funcțiunea $F(\bar{t})$ comparată cu expresia debitului în cazul unei curgeri staționare este analogă cu raportul $1/\ln r_d/r_c$. Se vede deci că deși debitul este inițial mult mai mare în cazul unui fluid compresibil față de cel al unei curgeri staționare, acesta tinde în timp spre o valoare mai mică decât a debitului staționar. Aceasta permite asimilarea sistemului nestaționar cu o succesiune de stări staționare între raza r_d (variabilă în timp) și $F(\bar{t})$ existind relația

$$F(\bar{t}) = \frac{1}{\ln \frac{r_d}{r_c}} \text{ sau } r_d = r_c e^{1/F'(\bar{t})}. \quad (235)$$

Pe baza acestor ecuații se vede că distanța la care se transmit turburările crește în timp.

În fig. 63 debitul $F(\bar{t})$ este reprezentat în funcție de \bar{t} , încât valorile necesare calculului ecuației (233) se extrag din această diagramă.

În fig. 64 curbele reprezintă variația cu timpul a integralei ecuației (233), (notată cu $G(\bar{t})$ de apă [conform ecuației (229)] ce a pătruns în zona de țigăi. Dacă presiunea impusă la contactul apă-țigăi (r_c) variază, atunci cu ajutorul fig. 64 se poate găsi expresia suprapunerii efectelor.

α_2) Căderi continue de presiune. În general căderea de presiune nu scade brusc și din această cauză se consideră că într-o variație $p(\bar{t})$ sînt de însumat o serie de segmente cu coeficient unghiular diferit. Volumul extras cumulativ va rezulta tot din suprapunerea efectelor

$$H = 2\pi m \beta r_c^2 \left[p'_0 \int_0^{\bar{t}} G(\bar{t}) d\bar{t} + p'_1 \int_0^{\bar{t}} G(\bar{t} - \bar{t}_1) d\bar{t} + \dots \right] \quad (236)$$

în care p'_0 și p'_1 sînt coeficienții unghiulari ai segmentelor din curba $p - \bar{t}$.

În fig. 65 este dată variația lui H în funcție de \bar{t} , în cazul unui declin liniar al presiunii de contur în timp și pe baza ei se poate rezolva ecuația (236).

b) Cazul apei de sinclinal finite. Zona de apă este considerată infinită cînd este mult mai mare decât zona de țigăi și exploatarea zonei de țigăi se termină înainte ca turburările produse prin exploatarea acesteia să atingă limitele zonei de apă.

Pentru a se putea găsi ordinea de mărime a zonei acvifere de la care mai departe, ea poate fi considerată practic infinită, se consideră că volumul de apă ce intră în zona de țigăi este egal cu 3/4 din volumul de pori ocupat cu țigăi.

$$\Delta p \beta V_a = 0,75 V_r$$

unde V_a este volumul porilor din zona de apă

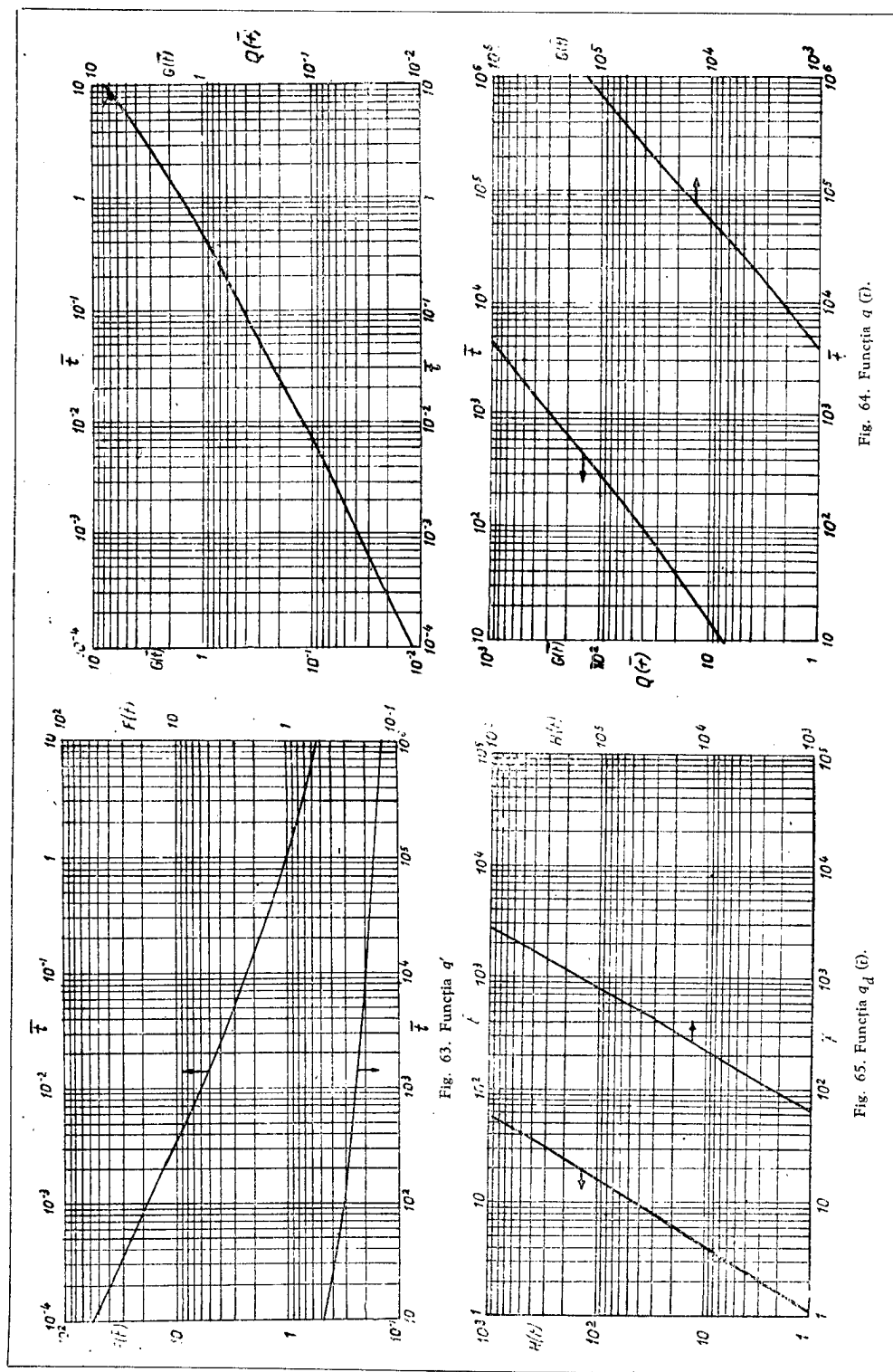


Fig. 63. Functia q'

Fig. 65. Functia q_d

Fig. 64. Functia q

și V_t volumul porilor din zona de țiței, sau înlocuind pe $\beta = 44 \cdot 10^{-6}/\text{at}$, se poate scrie:

$$\Delta p = 1,7 \times 10^4 \frac{V_t}{V_a}$$

În cazul staționar pentru $V_a = 1000 V_t$ corespunde $\Delta p = 17$ at. Dacă însă se presupune o variație logaritmică a presiunii în zona de țiței și grosimea stratului ca fiind uniformă atât în zona de țiței cât și în zona de apă, căderea medie de presiune Δp impune existența unei diferențe de presiune $p_i - p_d$,

$$p_i - p_d = \frac{\Delta p \left(\frac{V_a}{V_t} \right) \cdot \ln \frac{V_a}{V_t}}{\frac{V_a}{V_t} - \ln \frac{V_a}{V_t}} \quad (237)$$

Se obține astfel pentru $\frac{V_a}{V_t} = 100$, o diferență de presiune $p_i - p_d = 124$ at.

De aci se vede că dacă $\frac{V_a}{V_t} = 1000$, căderea de presiune în tot timpul producției este atât de mare încât rezultă caracterul infinit al zonei de apă. Caracterul finit însă, apare în timpul exploatării, căci la început zona căderii de presiune este încă în apropierea contactului apă-țiței.

Dacă V_a/V_t are ordinea de mărime 100, se obține o valoare $\Delta p = 1240$ at, de unde rezultă că în astfel de cazuri zăcămintul trebuie de la început considerat ca finit.

c) Exploatarea unui zăcămint mărginit de o apă de sinclinal finită cu presiune constantă pe conturul exterior.

1) Exploatarea la debit constant. În acest caz s-a considerat $r_d = 1$, iar presiunea la conturul circular de rază r_d ca fiind constantă și uniform distribuită, și un debit q_0 ce pătrunde în zăcămint.

Căderea de presiune la contactul apă-țiței este

$$\Delta p = \frac{\mu q_0}{2\pi k} \left\{ \ln \rho + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0^2(x_n \rho) e^{-x_n^2 \bar{t}}}{x_n^2 [J_0(x_n \rho) - J_1^2(x_n)]} \right\} \quad (238)$$

în care

$$\bar{t} = \frac{at}{r_c^2}; \quad \rho = \frac{r}{r_c}$$

$$\frac{2\pi k \Delta p}{\mu Q_0} = p(\bar{t})$$

$$x_n = \alpha_n \cdot r_c$$

— Q_0 este volumul cumulativ de fluid extras

pe unitatea de grosime de strat corespunzător debitului q_0 .

În fig. 59 se vede variația lui p în funcție de \bar{t} , în cazul raportului $r_d/r_c = 6$ (linia punctată). Se vede că pînă la $\bar{t} = 5$ curbele coincid,

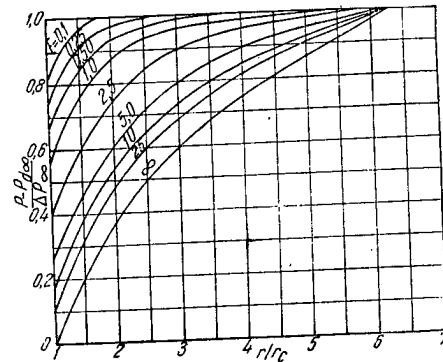


Fig. 66. Timpul (\bar{t}) pînă la stabilirea unei distribuții staționare a presiunii în cazul unei ape de sinclinal finite pentru un debit constant ($\rho = 6,3$).

iar la valori mari, ca spre exemplu, $\bar{t} = 20$, căderea de presiune a zăcămintului finit reprezintă 82% din cea a zăcămintului infinit. De aci se vede că în ecuația (232) căderea de presiune tinde către o valoare constantă staționară,

$$\Delta p_{\infty} = \frac{\mu Q_0}{2\pi k} \ln \frac{r_d}{r_c}$$

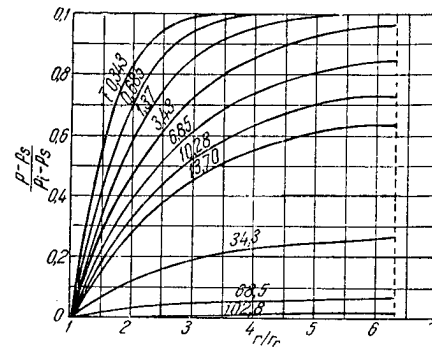


Fig. 67. Timpul (\bar{t}) și căderea de presiune în cazul unei ape de sinclinal finite, pentru o presiune constantă p_s . ($\rho = 6,5$).

Modul în care apare distribuția presiunii $\frac{r_d}{r_c} = 6,3$ este arătat în fig. 66 în care raportul

$\frac{p - p_{f\infty}}{\Delta p_{\infty}}$ este reprezentat față de $\frac{r_d}{r_c}$ pentru diverse valori ale lui \bar{t} .

În fig. 67 este redată funcția $p(\bar{t})$ față de \bar{t} pentru diverse valori ale lui $\rho = \frac{r_d}{r_c}$.

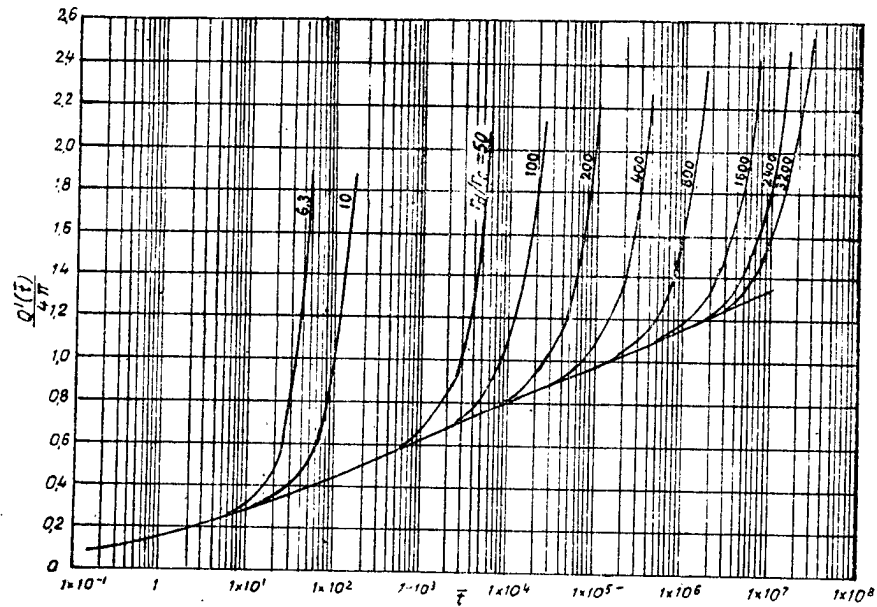


Fig. 68. Variația debitului cu timpul adimensional \bar{t} în cazul unui zăcămint cu apă de sinclinală finită, pentru menținerea unei presiuni constante.

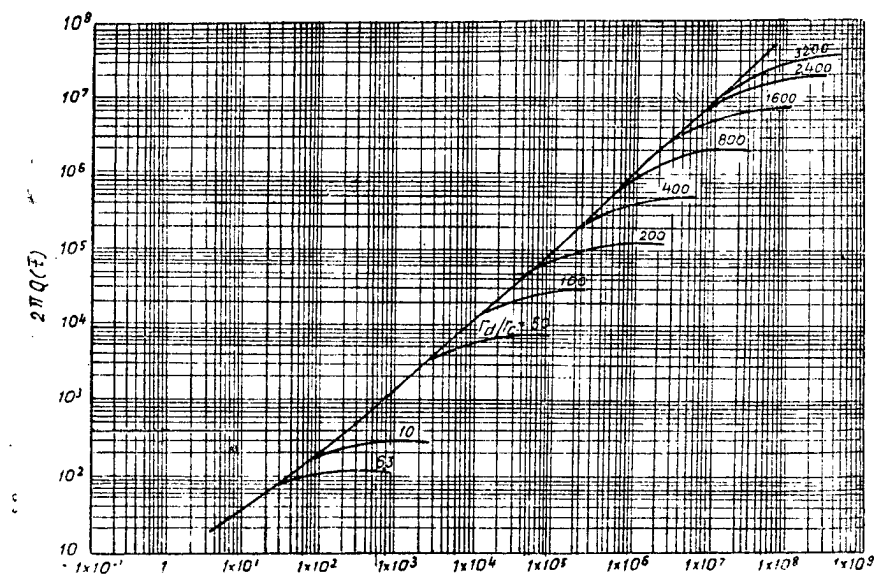


Fig. 69. Variația debitului cumulativ \bar{Q} în cazul unui zăcămint cu apă de sinclinală finită, pentru menținerea unei presiuni constante.

2) Exploatarea cu o cădere de presiune prescrisă la contactul apă-țiței. Forma generală a ecuației este următoarea, pentru grosimea unitară de strat,

$$Q(\bar{t}) = 2\pi m r_c^2 \left\{ \frac{\bar{t}}{\ln \rho} + \frac{1}{4(\ln \rho)^2} \times \left[\rho^2 - 1 - 2 \ln \rho - 2(\ln \rho)^2 \right] - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(x_n \rho) e^{-x_n^2 \bar{t}}}{x_n^2 [J_0^2(x_n) - J_1^2(x_n \rho)]} \right\} \quad (239)$$

Zăcămînd mărginit de o zonă de apă închisă în exterior și întindere finită, exploatată la o cădere de presiune constantă.

Volumul de fluid intrat la distanța r_c este, pe unitate de grosime de strat, următorul, ținînd seama de caracterul finit al zăcămîntului:

$$q(t) = \frac{2\pi k (p_i - p_c)}{\mu} Q(\bar{t}) = \frac{4\pi k (p_i - p_c)}{\mu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(x_n \rho) e^{-x_n^2 \bar{t}}}{J_0^2(x_n) - J_1^2(x_n \rho)} \quad (240)$$

Funcția (43) a fost reprezentată în fig. 68 în ordonată, găsiindu-se expresia

$$\frac{Q(\bar{t})}{4\pi} = \frac{k (p_i - p_c)}{\mu} F(\bar{t}), \quad (241)$$

iar în abscisă timpul \bar{t} și s-au trasat diverse curbe pentru valori ale raportului r_d/r_c cuprinse între 6,3 și 3200.

Producția cumulativă $Q(\bar{t})$, ca urmare a ecuației (240) în funcție de timpul adimensional este dată în fig. 69.

Înfășurătoarea reprezintă curba corespunzătoare cazului unui zăcămînt cu apă de sinclinal infinită.

5. Efectul închiderii sondei asupra nivelului dinamic al sondei. În urma închiderii unei sonde (fig. 70) nivelul dinamic (A) crește ocupînd diverse poziții: $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$, pînă cînd ajunge în B (nivelul static).

Se consideră deci:

- în punctul A este presiunea dinamică p_s ;
- în punctul C este o presiune oarecare p (între p_d și p_0);
- în punctul B este presiunea statică p_0 .

Considerînd că după închiderea sondei nivelul dinamic crește din A în C (pe o înălțime h) se poate scrie că raportul creșterii h , față de creșterea totală δ este

$$\alpha = \frac{h}{\delta} = 1 - \frac{S}{d} = \frac{p_0 - p_d}{p_s - p_d} \quad (242)$$

$$\alpha = 1 - \frac{p_d - p_0}{p_d - p_s} \quad (243)$$

care α variază între 0 și 1.

În același mod, dacă o sonda este pusă în exploatare nivelul fluidului scade din poziția B la diverse poziții C pînă cînd se stabilește în A. Făcînd raportul dintre scăderea S a nivelului din B în C, față de diferența totală de nivel δ se poate scrie

$$\alpha' = \frac{BC}{AB} = \frac{S}{d} = \frac{p_0 - p}{p_0 - p_d} = 1 - \alpha \quad (244)$$

Din cele două ecuații (243) și (244), precum și din ecuațiile (200) și (204), se poate obține variația presiunii în raport cu timpul. Pentru aceasta mai este utilizată și fig. 70 care dă variația lui α , în raport cu timpul \bar{t} , pentru diverse raporturi între raze.

Modul de determinare a presiunii este următorul:

— Se determină o serie de valori pentru \bar{t} legat de timpul dimensional prin ecuațiile (200) și (204).

— Pentru fiecare timp \bar{t} (respectiv t dimensional) corespunde o valoare α sau α' , pe ordonata diagramei fig. 71.

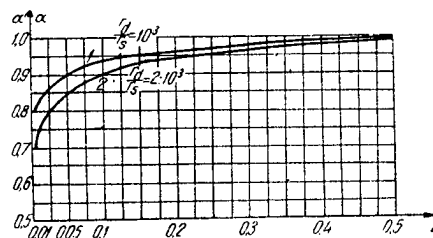


Fig. 70. Creșterile nivelului într-o sondă după închiderea acesteia, văzută într-o secțiune verticală prin mediul poros.

Fig. 71. Variația creșterii α a nivelului dinamic în funcție de \bar{t} după închiderea sondei și variația descreșterii α' a nivelului dinamic în funcție de \bar{t} după pornirea unei sonde.

— Cunoscîndu-se valoarea α , sau α' , și fiind cunoscută diferența $p_0 - p_d$, valoarea presiunii P rezultă din ecuația (243) sau (244), după cum sonda este închisă sau deschisă.

b. Curgerea gazelor în mediul poros

Curgerea gazelor într-un mediu poros este caracterizată prin următoarele ecuații:

Ecuația lui Darcy (49)

$$v = - \frac{k}{\mu} \nabla p$$

care, cuplată cu ecuația continuității, dă

$$\nabla^2 p^{\frac{1+b_0}{b_0}} = \frac{(1+b_0) \mu f p_0^{1/b_0}}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (244)$$

Ecuția de stare (64) ce se folosește este

$$\rho = \rho_0 p^{b_0}$$

în care b_0 , este determinat de caracterul termodinamic al expansiunii gazelor

$$b_0 = 1 - \text{expansiune izotermică};$$

$$b_0 = \frac{C_v}{C_p} - \text{expansiune adiabatică}.$$

Ecuția (244) se aplică atât la curgeri staționare, cât și la curgeri nestaționare.

Pentru rezolvarea problemei curgerii gazelor, ținându-se seama de variațiile mici de temperatură în masa de gaze și schimbul redus de căldură ce are loc între gaze și mediul poros, curgerea gazelor se consideră ca un proces izotermic.

Examinarea curgerii gazelor se face după natura legii de curgere (legea liniară sau neliniară de filtrare) după felul curgerii (staționară sau nestaționară) și după tipul de curgere (unidimensională, radial-plană).

În cazul valabilității legii lui Darcy, ecuația întrebuințată este ecuația (49), care se mai poate scrie pentru gaze sub forma vitezei de masă

$$\gamma V = -\gamma \frac{k}{\eta} \nabla p \quad (245)$$

în care γ , este greutatea specifică a gazelor.

1. Curgerea staționară a gazelor printr-un mediu poros. Pentru a putea admite existența unei curgeri staționare, se consideră că pe măsura extragerii gazelor din mediul poros, un alt volum de gaze din rezervorul ce alimentează vine și ia locul gazelor ieșite. În acest fel, presiunea la conturul de alimentare rămâne constantă.

a) Curgerea unidimensională staționară a gazelor. Se consideră un mediu poros de lungime L , ca în fig. 72 la al cărui contur de ali-

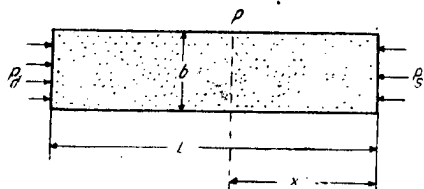


Fig. 72. Secțiunea orizontală printr-un strat în cazul curgerii unidimensionale a gazelor.

mentare lucrează presiunea p_d . Gazele curg spre un șir de sonde infinit apropiate între ele (practic o galerie) a căror presiune este p_s .

Cuplind ecuația (244) pentru o curgere staționară, cu ecuația (64) rezultă

$$\nabla^2 p^{\frac{1+b_0}{b_0}} = \nabla^2 p^{\frac{1}{b_0}} = 0 \quad (246)$$

1) Distribuția presiunii, se obține din integrarea ecuației (246) între limitele zăcămintului,

$$p^{1+b_0} = \left(p_c^{1+b_0} - p_s^{1+b_0} \right) \frac{x}{L} + p_s^{1+b_0} \quad (247)$$

sau ținând seama că are loc o curgere izotermă ($b_0 = 1$) distribuția presiunii va fi:

$$\left. \begin{aligned} p &= \sqrt{p_s^2 + \frac{p_d^2 - p_s^2}{L} x} \\ p &= \sqrt{p_d^2 - \frac{p_d^2 - p_s^2}{L} (L-x)} \end{aligned} \right\} \quad (248)$$

în care p este presiunea corespunzătoare unei distanțe x .

Ecuțiile (248) ce reprezintă distribuția presiunii într-o curgere unidimensională-staționară sînt niște parabole ca în fig. 73, spre deo-

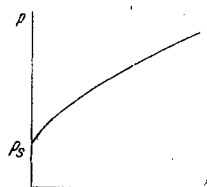


Fig. 73. Distribuția presiunii p în cazul curgerii unidimensionale a gazelor prin mediul poros.

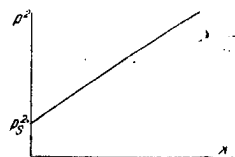


Fig. 74. Distribuția pătraturii presiunii p^2 în cazul curgerii unidimensionale a gazelor printr-un mediu poros.

sebite de o curgere liniară a fluidelor incompresibile, unde distribuția presiunii era o dreaptă. Se poate obține o dreaptă înlocuind $p = p^2$ ca în fig. 74.

Se întrebuințează adesea noțiunea de presiune medie ponderată cu volumul gazelor aflate în mediul poros. Notînd volumul mediului poros cu Ω , porozitatea cu m , secțiunea mediului poros F și lungimea acestuia L , se poate scrie

$$\Omega = m \cdot F \cdot L, \quad (249)$$

În acest fel presiunea medie \bar{p} , ponderată cu volumul Ω , este

$$\bar{p} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} p \, d\Omega \quad (250)$$

unde

$$d\Omega = m \cdot F \cdot dx \quad (251)$$

Combinînd ecuația (249) cu (251) și (248) se poate scrie

$$\bar{p} = \frac{1}{L} \int_0^L \sqrt{p_s^2 + \frac{p_d^2 - p_s^2}{L} x} \cdot dx \quad (252)$$

în cazul particular cînd $p_s = 0$

$$\bar{p} = \frac{2}{3} p_d$$

2) Ecuația debitului. Debitul se obține în cazul curgerii gazelor ca debit volumetric Q și ca debit de masă G . Păstrând aceleași condiții ca pentru obținerea distribuției presiunii s-a găsit

$$G = \frac{kF\gamma_0}{2\mu p_0} \cdot \frac{p_d^2 - p_s^2}{L} \quad (253)$$

sau împărțind debitul G la greutatea specifică γ , rezultă tocmai debitul-volum normal Q

$$Q = \frac{kF}{2\mu p_0} \cdot \frac{p_d^2 - p_s^2}{L} \quad (254)$$

unde p_0 este presiunea atmosferică.

Spre deosebire de ecuația (73) pentru curgerea fluidelor incompresibile, debitul Q este proporțional cu diferența pătratelor presiunilor. Din acest motiv variația $(Q - \Delta P)$ este după ecuația (254), parabolică și nu liniară, ca în cazul fluidelor incompresibile, fig. 12.

Pentru a obține o ecuație asemănătoare cu (73) s-a introdus noțiunea de debit mediu \bar{Q} de gaze, redus la presiunea medie aritmetică $\frac{p_d + p_s}{2}$,

$$\bar{Q} = \frac{Q}{\frac{p_d + p_s}{2}} \quad (255)$$

în care substituind ecuația (254) rezultă:

$$\bar{Q} = \frac{kF}{\mu p_0} \cdot \frac{p_d - p_s}{L} \quad (256)$$

3) Distribuția vitezei rezultă din împărțirea debitului (ecuația 254) la secțiunea F sau din combinarea ecuației (245) cu (248)

$$v = -\frac{k}{2\mu} \cdot \frac{p_d^2 - p_s^2}{L} \cdot \frac{1}{p} \quad (257)$$

în care presiune p după cum rezultă din ecuația (248) variază cu distanța x . Aceasta înseamnă că și viteza variază de la un punct la altul, spre deosebire de cazul curgerii lichidelor incompresibile când viteza rămâne constantă în tot timpul curgerii [ecuația (76)].

b) Curgerea staționară radial-plană a gazelor printr-un mediu poros. Pentru curgerea staționară radial-plană se întrebuițează aceeași ecuație (49) în care însă elementul de parcurs este raza r

$$\gamma v = -\gamma \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r}$$

Cuplind ecuația vitezei cu ecuația (246) de stare, și separind variabilele, se găsește relația între presiunea p și distanța r de la centrul conturului.

Condițiile-limită, pe fig. 10 sînt următoarele:

$$\left. \begin{aligned} p &= p_c \text{ la } r = r_c \\ p &= p_s \text{ la } r = r_s \end{aligned} \right\} \quad (258)$$

1) Distribuția presiunii. Folosind condițiile limită (258) rezultă următoarea distribuție a presiunii în mediul poros:

$$p = \sqrt{p_s^2 + \frac{p_c^2 - p_s^2}{\ln \frac{r_c}{r_s}} \cdot \ln \frac{r}{r_s}} \quad (259)$$

sau

$$p = \sqrt{p_c^2 - \frac{p_c^2 - p_s^2}{\ln \frac{r_c}{r_s}} \cdot \ln \frac{r_c}{r}} \quad (259')$$

Se observă că presiunea din ecuațiile (259) și (259') este mult diferită de presiunea obținută în ecuațiile (90) pentru curgerea unui fluid incompresibil. Considerind $p_s = 0$, se obține în cazul curgerii gazelor

$$\frac{p}{p_c} = \sqrt{\frac{\ln \frac{r}{r_s}}{\ln \frac{r_c}{r_s}}} \quad (260)$$

în timp ce din ecuația (90) în cazul că $p_s = 0$, pentru lichide incompresibile se obține raportul

$$\frac{p}{p_c} = \frac{\ln \frac{r}{r_s}}{\ln \frac{r_c}{r_s}} \quad (261)$$

în cazul particular $r_s = 0,1$ m și $r_c = 750$ m reprezentînd cele două ecuații (260) și (261) se obțin curbele trasate în fig. 75. Se vede că

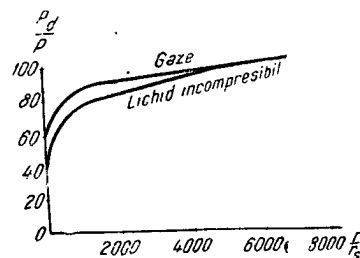


Fig. 75. Compararea distribuției presiunii în cazul curgerii gazelor și a lichidelor incompresibile prin mediul poros (presiunea $p_s = 0$).

în cazul fluidelor compresibile căderea de presiune este mult mai importantă în imediata apropiere a găurii de sondă.

Presiunea medie ponderată \bar{p} în cazul curgerii radial-plane provine din raportul presiunii la volumul spațiului de pori ocupat de gaze

$$\Omega = \pi (r_d^2 - r_s^2) h f \quad (262)$$

Ținând seama de ecuația (259) și de ecuația (262) se ajunge la următorul rezultat:

$$\bar{p} = \frac{2}{r_d^2 - r_s^2} \times \int_{r_s}^{r_d} \sqrt{p_s^2 + \frac{p_d^2 - p_s^2}{\ln r_d/r_s} \cdot \ln \frac{r}{r_s}} \cdot r \cdot dr \quad (263)$$

sau din ecuația (259') rezultă o presiune medie ponderată,

$$\bar{p} = \frac{2}{r_d^2 - r_s^2} \times \int_{r_s}^{r_d} \sqrt{p_c^2 - \frac{p_d^2 - p_s^2}{\ln r_d/r_s} \cdot \ln \frac{r_c}{r}} \cdot r \cdot dr \quad (263')$$

Din integrarea ecuațiilor (263) și (263') se poate spune că presiunea este relativ apropiată de presiunea de contur, mai ales la presiuni diferențiale

mici și raporturi mari $\frac{r_c}{r_s}$.

2) Ecuația debitului. Se deduce tot din viteza lui Darcy înmulțită cu secțiunea. Ținând seama de condițiile-limită (258) rezultă: debitul de masă

$$G = \frac{\pi k h \gamma_0}{\mu p_0} \cdot \frac{p_d^2 - p_s^2}{\ln r_d/r_s} \quad (264)$$

sau debitul volum-normal

$$Q = \frac{\pi k h}{\mu p_0} \cdot \frac{p_d^2 - p_s^2}{\ln r_d/r_s} \quad (265)$$

Ecuația debitului gazelor este, după cum se vede, mult diferită de ecuația (92) pentru fluidele incompresibile.

3) Distribuția vitezei se obține din ecuația (245) în care se diferențiază presiunea p din ecuația (259), fie direct prin raportul debitului, la secțiune conform ecuației (265)

$$v = - \frac{k}{2 \mu} \cdot \frac{p_c^2 - p_s^2}{\ln r_c/r_s} \cdot \frac{1}{r \cdot p} \quad (266)$$

în care, v este viteza corespunzătoare distanței r de la axul sondei (centrul conturului), iar p se calculează din ecuația (259).

c) Curgerea staționară tridimensională a gazelor printr-un mediu poros. În cadrul acestui fel

de curgere se examinează în special cazul sondelor imperfecte din punctul de vedere al gradului de deschidere. Ținând seama de cele stabilite pentru curgerea fluidelor în cazul sondelor imperfecte, (v.D.f.) variația raportului Q/Q_0 față de penetrarea (procentuală) a sondei a fost trasată în fig. 76, pentru cazul unei sonde de rază $r_s = 7,5$ cm și a unui contur circular de alimentare de rază $r_d = 150$ m. Se vede din această figură dacă gradul de străpungere este de 75%, debitul de gaz reprezintă 87,5% din debitul ce s-ar obține în cazul unei sonde perfecte, iar la o străpungere de 67%, valoarea debitului sondei imperfecte este redusă la 50% din valoarea debitului unei sonde perfecte.

Aceiași situație se poate observa și în fig. 77, în care este redat raportul Q/Q_0 (debitul son-

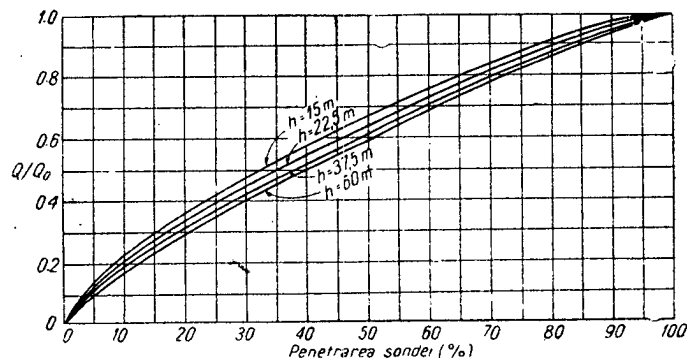


Fig. 76. Variația raportului debitelor Q/Q_0 (Q_0 — debitul unei sonde perfecte hidrocinamic) în funcție de gradul de străpungere (penetrarea) a sondei pentru diverse grosimi de strat ($r_s = 7,5$ cm; $r_d = 150$ m).

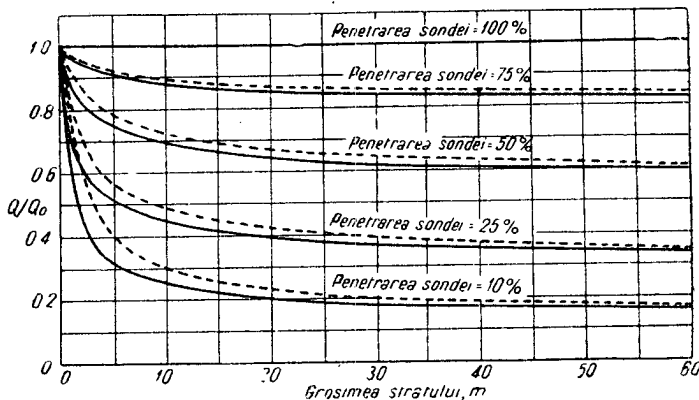


Fig. 77. Variația raportului debitelor Q/Q_0 (Q_0 — debitul unei sonde perfecte hidrocinamic) în funcție de grosimea stratului h , pentru diverse grade de străpungere (penetrări) ale sondei ($r_d = 150$ m; linia continuă $r_s = 7,5$ cm; linia punctată $r_s = 3,75$ cm).

dei imperfecte împărțit la debitul sondei perfecte) față de grosimea stratului h , pentru diverse penetrări.

2. **Curgerea nestaționară a gazelor printr-un mediu poros.** În cazul curgerii nestaționare zăcămintul este considerat ca un rezervor închis, ale cărui rezerve nu sînt completate din afară în timpul exploatarei. Problema zăcămintelor de gaze a fost studiată detaliat de Prof. sovietic B. B. Lapuk. Pe considerentele bilanțului material, B. B. Lapuk a stabilit relația de bază, numită ecuația diferențială de bilanț material

$$Qdt = - \Omega d\bar{p} \quad (267)$$

în care:

- q este debitul de gaze în condițiile presiunii atmosferice;
- t — timpul;
- Ω — volumul spațiului poros ocupat de gaze;
- \bar{p} — presiunea medie ponderată cu volumul porilor.

În realitate s-a găsit că \bar{p} coincide, practic, cu presiunea pe contur p_d și deci se poate rescrie ecuația (266) sub forma:

$$Qdt = - \Omega dp_d \quad (267')$$

Acestei ecuații (267) i se impun următoarele condiții:

— condiții inițiale:

înainte de a începe exploatarea presiunea este constantă în tot mediul poros

$$p = p_i = p_c \text{ la } t = 0;$$

— condiții-limită;

— cazul unei exploatare în care se poate menține o presiune constantă la sondă

$$p_s = \text{const, la } r = r_s$$

— cantitatea de gaze variază în timp după necesități, sau se poate impune un debit constant de exploatare

$$Q = \text{const};$$

— sonda poate fi exploatată menținându-se o viteză de filtrare anumită

$$Q = c \cdot p_s$$

în care c este o constantă.

Pe baza acestor condiții-limită se pot studia diversele tipuri de curgere.

F. CURGEREA GRAVITAȚIONALĂ

a. Generalități

În cazul cînd afluxul de țiței în spre sondă este foarte mic, pompa de extracție menține un nivel de lichid mai coborît decît coperișul stratului. Ca urmare a acestei situații, efectul gravitației rămîne cel predominant în procesul de curgere, situație ce se accentuează cu cît grosimea stratului este mai mare. Efectul gravitației se poate exercita ca sursă predominantă de energie numai atunci cînd energia de compresiune a fost complet epuizată.

În fig. 79 prin h_s este prezentat nivelul în sondă, AB fiind suprafața de prelingere, prin h_d nivelul de fluid la conturul de alimentare ($h_d <$ grosimea stratului). Curgerea are loc sub acțiunea diferenței de presiune $h_d - h_s$, și poartă numele de curgere cu suprafața liberă.

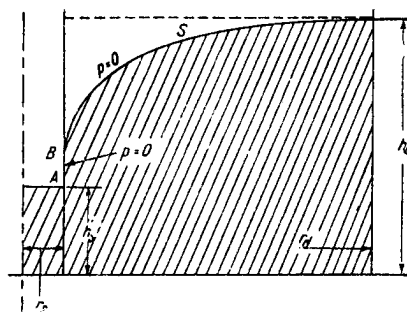


Fig. 78. Secțiune verticală în cazul unei curgeri radial-plane sub acțiunea gravitației.

Condițiile acestei curgeri sînt de ajuns de greu de rezolvat din punct de vedere analitic și acestea devin și mai dificile dacă deasupra masei de țiței există o zonă de gaze libere.

b. Curgerea unidimensională sub acțiunea gravitației

Pentru rezolvarea acestei probleme s-a admis existența unui rezervor fig. 78 de alimentare, de înălțimea h_d , care alimentează o galerie paralelă cu bazinul. Trecerea lichidului de la

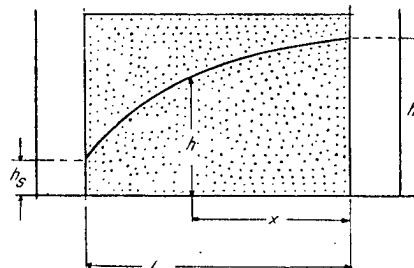


Fig. 79. Secțiune verticală în cazul unei curgeri unidimensionale sub acțiunea gravitației.

bazin la galerie se face printr-un mediu poros de lungime L .

S-au făcut următoarele ipoteze simplificatoare:

- în toate punctele unei secțiuni verticale prin mediul poros vitezele de filtrare sînt egale și puțin înclinate față de orizontală;
- liniile de curent sînt aproximativ rectilinii și orizontale.

1. **Cazul valabilității legii liniare de filtrare.** Pe aceste considerente a fost determinată valoarea înălțimii h cuprinsă între h_s și h_d la o distanță x de h_s .

În felul acesta h este în funcție de h_d și h_s , după cum se vede:

$$h^2 = h_d^2 - \frac{h_d^2 - h_s^2}{L} x \quad (280)$$

Ecuția debitului este dată de relația:

$$Q = \frac{bk\gamma (h_d^2 - h_s^2)}{2\mu L} \quad (281)$$

în care b este lățimea stratului;

γ — greutatea specifică a fluidului.

Ecuția vitezei se obține din raportarea ecuației (281) la secțiunea de curgere

$$v = \frac{Q}{b \sqrt{h_d^2 - \frac{2Q\mu}{ak\gamma} x}} \quad (282)$$

Pe baza ecuației (280) se poate practic determina distribuția curbei de depresiune, care este un arc de parabolă. Ținând seama de ecuația (12), h^2 reprezintă în (280) și următoarele, patrul unor presiuni exercitate de coloane de fluid.

2. **Cazul valabilității legii neliniare de filtrare.** În acest caz debitul este dat de ecuația

$$Q = bc \left[\frac{h_d^{n+1} - h_s^{n+1}}{(n+1)L} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (283)$$

c. Curgerea radial-plană

1. **Cazul valabilității legii liniare de filtrare:** Pentru rezolvarea problemei curgerii radial-plane, (fig. 79) admitând conturul circular și sonda amplasată în centrul acesteia s-au presupus următoarele condiții-limită.

— potențialul este constant la conturul de alimentare

$$\Phi = \bar{k} h_d \text{ la } r = r_d$$

— potențialul este constant la conturul sondei

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \bar{k} h_s & \text{pentru } 0 \leq z \leq h_s \\ \Phi &= \bar{k} z & \text{pentru } h_s \leq z \leq h_d \end{aligned} \right\} \text{ la } r = r_s$$

— fluidul nu curge prin coperișul și culcușul stratului

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \text{ la } z = 0 \text{ și } z = h_d$$

în care $\bar{k} = \frac{k\rho g}{\mu}$.

Pentru soluționarea problemei s-a admis că suprafața liberă este în același timp linie de egal potențial și linie de curent.

Introducând condițiile-limită în ecuația de bază

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (284)$$

s-a obținut ecuația debitului de formă

$$Q = \frac{\pi k \rho g (h_c^2 - h_s^2)}{\mu \ln r_d / r_s} \quad (285)$$

Cercetările ce s-au făcut, au arătat valabilitatea acestei ecuații în special în cazul scăderilor mici ale nivelului.

— Ținând seama de ecuația (129) obținută în cazul unei distribuții neuniforme a presiunii pe contur, se poate scrie debitul în cazul că la $r = r_c$, coloana de fluid este mai mare decât grosimea stratului,

$$Q = \frac{2\pi h (\bar{p}_d - \bar{p}_s)}{\ln r_c / r_s} \quad (286)$$

în care:

h — grosimea stratului;

\bar{p}_d și \bar{p}_s — presiunile medii la conturul de alimentare și la gaura de sondă.

Expresiile lui p_d și p_s sînt următoarele:

$$\bar{p}_d = \frac{k\rho g h_d}{\mu} = \bar{k} h_d \quad (287)$$

$$\bar{p}_s = \frac{k\rho g (h_d^2 + h_s^2)}{2h_d \mu} \quad (288)$$

2. **Cazul valabilității legii neliniare de filtrare.** Ținând seama de legea neliniară de filtrare în aceleași condiții în care a fost examinată curgerea la punctul 1, s-au obținut următoarele ecuații.

Înălțimea h a lichidului la distanța r de centrul conturului de alimentare este dată de ecuația

$$h^{n+1} = h_d^{n+1} - \frac{n+1}{n-1} \left(\frac{Q}{2\pi c} \right)^n \frac{1}{r^{n-1}} - \frac{1}{r_d^{n-1}} \quad (289)$$

iar debitul Q este în acest caz

$$Q = 2\pi c \left[\frac{n-1}{n+1} \cdot \frac{h_d^{n+1} - h_s^{n+1}}{\frac{1}{r_s^{n-1}} - \frac{1}{r_d^{n-1}}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (290)$$

Observație. În cazul gazelor, compoziția gravitațională este neglijabilă iar curgerea cu suprafață liberă este practic inexistentă.

G. CURGEREA ETEROGENĂ

a. Generalități

Curgerea eterogenă înseamnă curgerea simultană a mai multor faze prin mediul poros. Condițiile în care poate avea loc o curgere eterogenă se găsesc pe scurt expuse în capitolul III.

Curgerea eterogenă a fluidelor constituie un proces nestaționar deoarece în timp, distribuția saturațiilor este modificată și ca urmare per-

meabilitățile efective, vitezele și debitele fiecăreia dintre faze se modifică deasemenea.

Considerentele ce au împiedicat tratarea curgerii eterogene ca fenomen nestaționar sînt:

Integrarea ecuațiilor (71, 71', 71'') este aproape imposibilă, încît rezolvarea acestei probleme trebuie încercată pe o cale aproximativă.

Ținînd seama de vitezele mici de curgere a fluidelor în strat, variația schimbării parametrilor fizici are loc atît de încet, încît se poate aproxima această curgere nestaționară cu o succesiune continuă de stări staționare.

Aproximațiile ce rezultă permit executarea calculelor practice.

b. Curgerea eterogenă staționară unidimensională

Ținînd seama de condițiile unei curgeri staționare și neglijînd forțele legate de masă, într-o curgere unidimensională ecuația (71) se reduce la forma

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{r_t k_t}{\mu_t b_t} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{r_a k_a}{\mu_a b_a} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho_g k_g}{\mu_g} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \quad (290)$$

ecuația (71') devine deasemenea

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_t}{\mu_t b_t} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \quad (290')$$

iar ecuația (71'')

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_a}{\mu_a b_a} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \quad (290'')$$

în care t , g și a sînt indicii pentru țitei, gaze, respectiv apă pe unitate de suprafață.

Prin integrarea ecuațiilor (290, 290', 290'') se obțin debitele de fluid

$$\left(\frac{r_t k_t}{\mu_t b_t} + \frac{r_a k_a}{\mu_a b_a} + \frac{\rho_g k_g}{\mu_g} \right) \frac{\partial p}{\partial x} = \text{const} = Q_g \quad (291)$$

$$\frac{k_t}{\mu_t b_t} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = \text{const} = Q_t \quad (291')$$

$$\frac{k_a}{\mu_a b_a} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = \text{const} = Q_a \quad (291'')$$

în care Q_g , Q_t și Q_a reprezintă respectiv debitele de gaze, țitei și apă pe unitate de suprafață.

Raportînd debitul de gaze și de apă la debitul de țitei se va obține

$$G = \frac{Q_g}{Q_t} = r_t + \frac{r_a k_a \mu_t b_t}{k_t \mu_a b_a} + \frac{\rho_g k_g \mu_t b_t}{k_t \mu_g} \quad (292)$$

$$\text{și} \quad R_a = \frac{Q_a}{Q_t} = \frac{k_a \mu_t b_t}{k_t \mu_a b_a} \quad (293)$$

în care G , este rația gaze-țitei și R_a rația apă-țitei. Se mai poate exprima G și sub forma:

$$G = r_t + r_a R_a + \alpha(p) \psi(S) \quad (294)$$

în care

$$\alpha(p) = \frac{\rho_g \mu_t \beta_t}{\mu_g} \quad (295)$$

$$\psi(S) = \frac{k_g}{k_t} \quad (296)$$

în care p este presiunea și S este saturația.

1. Distribuția presiunii. Pentru a obține distribuția presiunii considerînd un zăcămint de lungime L ca în fig. 9, în care la conturul de alimentare lucrează presiunea p_d și la sondă presiunea p_s , se obține următoarea ecuație

$$\frac{x}{L} = \frac{p_s}{p_d} = \frac{\int \left(\frac{k_t}{\mu_t b_t} \right) dp}{\int \left(\frac{k_t}{\mu_t b_t} \right) dp} \quad (297)$$

în care p este presiunea corespunzătoare unei distanțe x de la conturul de alimentare.

2. Ecuația debitului. Pentru obținerea debitului de țitei se scrie ecuația

$$Q_t = \frac{1}{L} \int_{p_s}^{p_d} \frac{k_t}{\mu_t b_t} dp \quad (298)$$

Înlocuind indicele t prin a în termenii ecuației (298), se obține respectiv debitul de apă.

3. Observații. Ecuația (291') se poate transcrie pentru a exprima gradientul de presiune

$$\frac{\partial p}{\partial x} = Q_t \frac{\mu_t b_t}{k_t}$$

Se observă că pe măsură ce presiunea scade, viscozitatea μ_t crește, iar permeabilitatea k_t devine mai mică. Ca urmare gradientul de presiune va crește și această creștere este compensată numai în mică parte de scăderea lui b_t .

Dacă faza de apă este mobilă, făcînd aceleași considerente în ecuația (291''), se vede că apa va curge în cele din urmă mai repede decît țiteiul μ_a rămînînd constant.

— Din ecuația (296) se poate vedea că valoarea lui ψ crește în regiunile cu presiune mai scăzută, întrucît crește saturația în fază gazosă din cauza gazelor ce ies din soluție.

— Într-o curgere eterogenă debitele sînt invers proporționale cu lungimea de parcurs, dar nu mai variază liniar cu presiunea diferențială.

4. Modul de lucru. Ecuațiile (297) și (298) nu se pot integra direct și în vederea rezolvării lor se procedează astfel:

— Se consideră constante valorile rațiilor Q sau R_a .

— Pe baza valorii constante a lui Q și R_a , și a celorlalte valori α , r_a și r_t (care sînt în funcție de presiune și se cunosc) se poate aprecia funcția $\psi(s)$.

— Din diagrama permeabilități, saturația se citește pentru valoarea lui $\psi(s)$, permeabilitatea k_t corespunzătoare respectivei saturații.

— Cunoscînd astfel pe k_t și avînd cunoscute din laborator valoarea lui μ_t și b_t se poate rezolva ecuația (297) și (298), prin integrare grafică.

c. Curgerea eterogenă staționară radial-plană

Pentru problema curgerilor radial-plane se vor analiza atît curgerile bifazice cît și trifazice.

1. Curgerea bifazică. a) Cazul curgerii gaz-țiței (apa imobilă). Ținînd seama de condițiile de simetrie a unei curgeri radiale-plane ecuațiile (71), (71') și (71'') vor fi integrate pe un element de rază dr .

1) Distribuția presiunii. Într-un zăcămînt circular cu aspectul fig. 10 pentru obținerea presiunii p la o distanță r de conturul circular de alimentare în același mod ca pentru curgerea unidimensională se obține:

$$\frac{\ln r/r_s}{\ln r_d/r_s} = \frac{\int_{p_s}^p \left(\frac{kt}{\mu_t b_t} \right) dp}{\int_{p_s}^{p_d} \left(\frac{kt}{\mu_t b_t} \right) dp} \quad (299)$$

2) Ecuația debitului de țiței se obține în aceleași condiții ca în cazul unei curgeri unidimensionale. Pentru o grosime de strat h , pentru o permeabilitate uniformă k rezultă astfel un debit,

$$Q_t = \frac{2\pi kh}{\ln r_d/r_s} \int_{p_s}^{p_d} \frac{k_t/k}{\mu_t b_t} dp \quad (300)$$

Se vede din ecuația (300) că debitul nu variază liniar cu diferența de presiune dp , datorită faptului că odată cu modificarea presiunii, are loc și o modificare a factorilor μ_t , b_t , și k_t .

În ipoteza existenței în strat numai a unei ape imobile (interstițiale), $R_a=0$ și deci ecuația (294) devine:

$$Q = r_t + \alpha(p) \psi(s) \quad (292')$$

În fig. 80 este redată variația permeabilitate-saturație.

Observații. Pentru rezolvarea problemei curgerii eterogene este absolut necesar să se cunoască presiunea la conturul de alimentare p_d și presiunea la gaura de sondă p_s .

— Între aceste limite variază și caracteristicile fizice: viscozitatea μ_t ; coeficientul de volum b_s ; saturațiile în țiței și gaze S_t și S_g , permeabilitățile efective k_g și k_t , astfel încît în timpul curgerii există o variație a caracteristicilor pe parcursul efectuat de țiței.

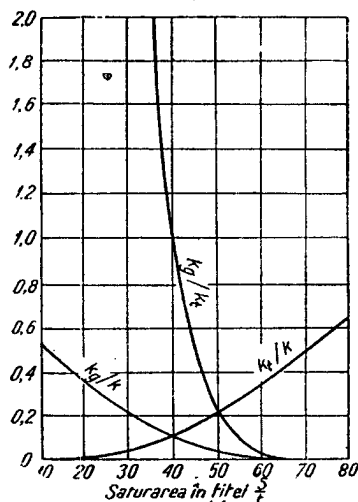


Fig. 80. Variația permeabilității efective k_g/k_t cu saturația.

Modul de lucru. Pentru datele din tabela 7 luate în cazul unui zăcămînt, s-au obținut următoarele rezultate:

Tabela 7. Curgerea eterogenă

P_{at}	Rația de soluție r , m^3/m^3	μ_g cP	μ_t cP	ρ_g	b_t
1	—	—	—	0	1
20	5,35	0,013	2,4	15	1,08
50	21,5	0,015	1,9	60	1,12
70	32,2	0,016	1,7	85	1,14
100	48,4	0,017	1,5	130	1,18
120	60,8	0,018	1,38	170	1,23
150	77	0,0186	1,21	200	1,26
170	96,5	0,0191	1,2	240	1,3

— Reprezentînd grafic fig. 81 variația lui ψ în funcție de presiune, s-au trasat trei curbe pentru diverse rații Q gaz-țiței. Din figura 81 se poate vedea cu cît rația Q este mai mare, cu atît valoarea lui ψ este mai mare. Acest lucru este evident, întrucît rația de gaze fiind mai mare, saturația în țiței este mai mică și ca urmare permeabilitatea k_t este redusă (vezi fig. 80).

Scăderea lui r_t duce la creșterea lui $\psi = k_g/k_t$.

Reprezentarea grafică a lui ψ s-a făcut utilizînd relația (300) care a fost explicitată față de ψ .

$$\psi(s) = \frac{k_g}{k_t} = \frac{Q - r_t}{\alpha(p)}$$

în care R reprezintă o valoare fixă, și S_t era luată din tabela 7, iar α a fost calculată pentru fiecare presiune cu valorile corespunzătoare luate din același tabel.

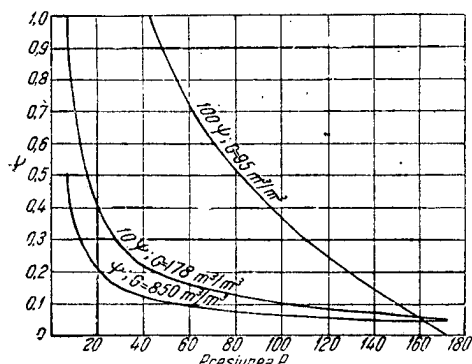


Fig. 81. Variația raportului k_g/k_t cu presiunea pentru diverse rații de gaze.

a fost de 168 at. Introducându-se toate valorile date în ecuația (301), s-a obținut debitul \bar{Q} pentru aceleași trei rații de gaze, iar rezultatele au fost reprezentate în fig. 82.

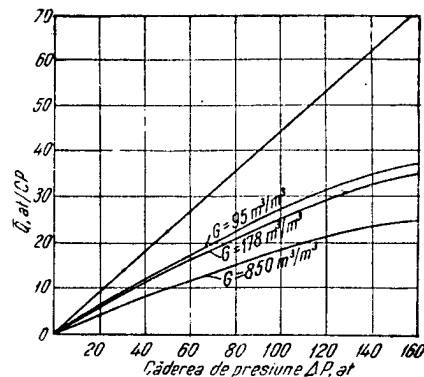


Fig. 82. Variația capacității de producție q cu căderea de presiune pentru diverse rații de gaze.

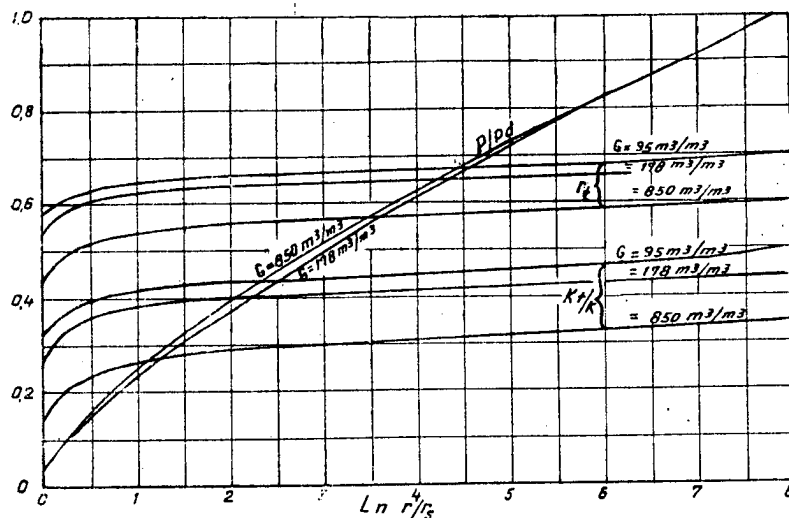


Fig. 83. Variația saturației S_t a raportului permeabilităților k_t/k și a raportului presiunilor p/b_d cu distanța între contur și sondă (cu $\frac{r}{r_s}$) pentru diverse rații de gaze ($p_d = 170$ m; $p_s = 0$ at; $r_d = 200$ m; $r_s = 7.5$ cm saturația în apă interstițială $S_a = 20\%$).

— Pentru a obține o imagine mai clară asupra variației debitului, s-a introdus noțiunea de capacitate relativă de producție:

$$\bar{Q} = \frac{Q_0}{2\pi kh} = \int_{p_s}^{p_d} \frac{k_t/k}{\mu_t b_t} dp \quad (301)$$

$$\ln r_d/r_s$$

Valorile capacității relative de producție \bar{Q} sint date în at/cP. Diferența totală de presiune

Comparînd cu linia dreaptă trasată pentru $G=0$ se poate vedea că la o curgere omogenă debitul este direct proporțional cu presiunea diferențială spre deosebire de curgerea eterogenă, unde variația este neliniară.

Se vede în fig. 82 că debitele sint din ce în ce mai mici, cu cît rația G este mai mare. Explicația acestor rezultate este că la o creștere a lui G , corespunde o creștere a lui ψ , deci o scădere a lui k_t și respectiv o micșorare a debitului Q_t .

Ținând seama de variația în mediul poros a presiunii (p) saturației în țitei (S_t), și a permeabilității (k_t), în timp ce presiunea variază de la p_c la p_s , s-a trasat în fig. 83 variația acestor mărimi cu distanța de la centrul conturului de alimentare.

S-au luat astfel următoarele valori:

raza sondei..... $r_s = 7,5$ cm

raza conturului..... $r_d = 200$ m

diferența totală de presiune $\Delta p = 170$ at

și se pot observa următoarele:

— Saturația în țitei maximă este 70 % ținând seama de apa interstițială și de 10 % saturația în gaze, pentru care echilibrul curgerii omogene este încă menținut.

— Atît saturația în țitei, cît și permeabilitatea efectivă față de țitei descresc lent în mediul poros, doar în imediata apropiere a găurii de sondă, ele trec la valori sensibil mai mici.

— Distribuția presiunii rămîne liniară în reprezentarea semi-logaritmică, dar în apropierea imediată a sondei are totuși o alură curbă. Modificarea aceasta are ca urmare pentru saturație și permeabilitatea o descreștere bruscă în jurul găurii de sondă.

b) Cazul curgerii apă-țitei (gazele imobile). Această situație presupune, fie că gazele nu curg, fie că nu există o saturație în fază gazoasă.

Ca o curgere să fie strict staționară, ar trebui ca presiunea să fie mai mare decît presiunea de saturație, încît r_t și r_a să fie constante, iar valorile presiunii la sondă să fie mai mari decît presiunea la saturație.

Folosind ecuația (293), raportul permeabilităților k_a/k_t rezultă:

$$\frac{k_a}{k_t} = \frac{\mu_a b_a}{\mu_t b_t} R_a$$

Această ecuație dă raportul k_a/k_t ca o funcție de presiune, încît se poate face astfel legătura între presiune și saturație.

În cazul acestei curgeri, presiunea care este în funcție de presiunile la contur p_d și la sondă p_s are expresia

$$p = p_s + \frac{p_d - p_s}{\ln r_d/r_s} \cdot \ln \frac{r_s}{r}$$

iar debitele sînt respectiv:

$$Q_t = \frac{2\pi k_t h (p_d - p_s)}{\mu_t b_t \ln r_d/r_s} \quad (302)$$

și

$$Q_a = \frac{2\pi k_a h (p_d - p_s)}{\mu_a b_a \ln r_d/r_s} \quad (303)$$

În fig. 84 este redată variația raportului k_t/k_a , față de saturația în țitei pentru diverse valori ale saturației în gaze S_g . Se vede pe această diagramă, că pe măsura creșterii saturației în țitei raportul k_t/k_a scade rapid.

Considerînd $\mu_a = 1$ cP., $b_a = 1$, $\mu_t = 1,2$ cP. și $b_t = 1,2$ din curbele (fig. 84) și ecuația (293) se obțin rezultatele din fig. 85. Curba aceasta pentru variația rației apă-țitei (R_a) cu saturația,

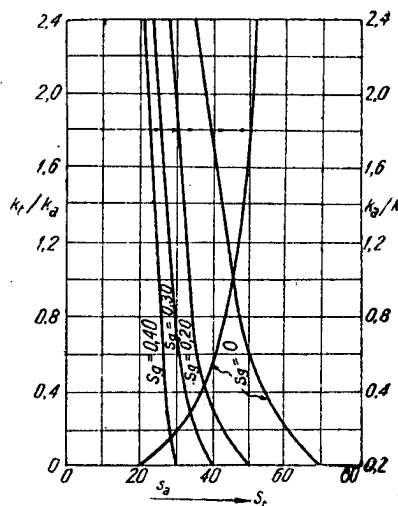


Fig. 84. Variația permeabilității-saturație pentru țitei și apă în funcție de saturația în țitei, pentru anumite valori ale saturației în gaze (S_g).

seamănă cu curbele permeabilitate-saturație pentru gaze.

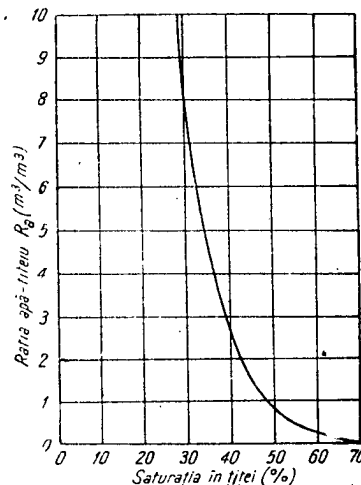


Fig. 85. Variația rației apă-țitei cu saturația în țitei în cazul unei curgeri staționare a sistemului apă-țitei, pe baza fig. 89 (viscozitatea apă $\mu_a = 1$ cP și a țiteiului

$\mu_t = 1,2$ cP. și factorii de volum $b_a = 1$ și $b_t = 1,2$).

2. Curgerea trifazică. Pentru curgerea trifazică problema este asemănătoare cu cea din cazul curgerii bifazice, urmînd a se folosi

în mod analog diagramele permeabilitate-saturație (vezi cap. Fizica zăcămintului).

Pentru o anumită presiune, se alege o anumită valoare a lui Q și R_a și se calculează k_g/k_t din ecuația (294). În același mod, k_t/k_a se

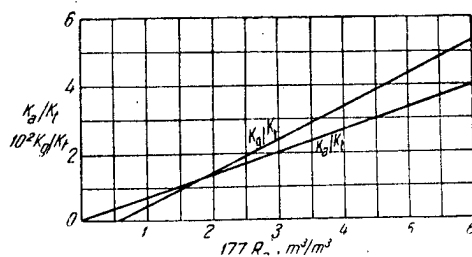


Fig. 86. Raportul permeabilităților k_g/k_t și k_a/k_t în funcție de rațiile gaz-țiței (Q) și apă-țiței (R_a); se consideră $\mu_a = 1$ c.P. și $b_a = 1,05$.

poate calcula din ecuația (293) și astfel distribuția fluidelor în zăcămint se găsește pe baza diagramelor permeabilitate-saturație.

În cazul valorilor din tabela 7 pentru o diferență de presiune de 170 at, s-a găsit variația lui k_g/k_t din fig. 86. De asemenea în această

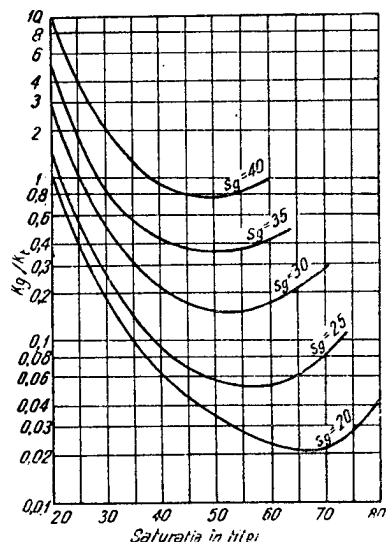


Fig. 87. Variația raportului k_g/k_t în funcție de saturația în țiței în cazul unui sistem apă-gaz-țiței pentru diverse saturații (S_g) în gaze.

figură sînt trasate valorile raportului k_a^2/k_t ca o funcție de R_a pentru $\mu = 1$ și $b_a = 1,05$. Saturațiile corespunzătoare lui k_a/k_t din figura 86 sînt determinate cu ajutorul figurilor 83 și 86. În fig. 87 sînt redată influența saturației în gaze libere asupra raportului k_g/k_t . Creșterea rapidă a curbelor în partea stîngă a diagramei

se datorește scăderii saturației în țiței, iar căderea inițială a curbelor este datorită raportului permeabilitate-saturație, care provoacă o scădere a permeabilității față de gaze (deși saturația în gaze este constantă) cînd apa începe să deplaseze țițeiul.

H. TEORIA HIDRODINAMICĂ A UNOR PROBLEME DE EXPLOATARE

a. Teoria hidrodynamică a exploatării țițeiului prin împingere de apă

1. Noțiuni generale. Exploatarea țițeiului prin împingerea de apă constituie o problemă de un interes teoretic și practic deosebit. În cadrul studiului hidrodynamic al acestei probleme este în special interesant de urmărit deplasarea contactului apă-țiței.

Pentru rezolvarea problemei se consideră că viscozitatea țițeiului diferă de viscozitatea apei, însă se presupune că greutatele specifice ale apei și țițeiului sînt egale*).

Pe aceste considerente se poate admite că în cazul unei înclinări mici a straturii, dacă distanța dintre sondă și contactul apă-țiței este mult mai mică, decît distanța dintre sondă și conturul de alimentare, suprafața de contact apă-țiței are o așezare după verticală.

Aceiași problemă devine ceva mai complicată în cazul exploatării zăcămintelor de gaze, unde greutatea specifică și viscozitatea apei este mult diferită de cea a gazelor. Totuși, o asemenea situație în exploatarea unui zăcămint de gaze, trebuie examinată foarte atent în vederea proiectării amplasării sondelor.

2. Avansarea contactului apă-țiței. Problema avansării contactului apă-țiței din poziția inițială pînă la gaura de sondă a fost studiată în cazul curgerii unidimensionale și a curgerii radial-plane.

a) Cazul curgerii unidimensionale. În cazul acestei probleme se consideră un zăcămint care într-o secțiune orizontală apare ca în fig. 88. Zăcămintul are o lungime L și o secțiune constantă. Între conturul de alimentare și linia a se află pe lungimea X_0 zona inițială de apă, iar de la linia punctată la șirul de sonde, se află zona de țiței. Din poziția inițială X_0 , contactul apă-țiței va ocupa în timpul exploatării poziția a . În acest fel, la contactul apă-țiței va exista o presiune p_a , iar acest contact se va deplasa cu o viteză v_a .

1) Distribuția presiunii. Folosind ecuațiile (75) și (76) de la curgerea unidimensională, se va determina distribuția presiunii în zona de apă și distribuția presiunii în zona de țiței. Datorită faptului că permeabilitatea k , se presupune constantă în întreg mediul poros și admitînd fluidul incompresibil și continuitatea curgerii la suprafața de con-

* Studii mai recente consideră și permeabilități efective diferite în zonele saturate inițial cu apă, cu țiței și invadată cu apă.

tact apă-țiței, se poate obține distribuția presiunii în zona de țiței.

Astfel se va obține în funcție de diferența totală de presiune $p_d - p_s$, valoarea presiunii

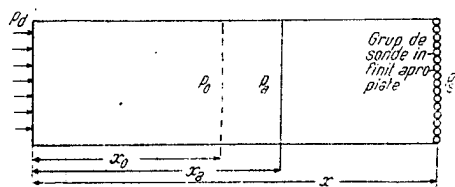


Fig. 88. Secțiune orizontală printr-un strat în cazul deplasării contractului apă-țiței la o curgere unidimensională

p_t în zona de țiței corespunzătoare unei distanțe x de la conturul de alimentare:

$$p_t = p_s + \frac{\mu_t (p_d - p_s)}{\mu_t (L - x_a) + \mu_a x_a} (L - x) \quad (304)$$

și valoarea presiunii în zona de apă:

$$p_a = p_d - \frac{\mu_a (p_d - p_s)}{\mu_t (L - x_a) + \mu_a x_a} x. \quad (305)$$

2) Distribuția vitezei. Introducând în ecuația lui Darcy (25) valoarea presiunii din ecuațiile (304) și (305) se obține distribuția vitezei de forma

$$v = \frac{k (p_d - p_s)}{\mu_t (L - x_a) + \mu_a x_a} \quad (306)$$

3) Ecuația debitului se obține înmulțind viteza din ecuația (306) cu secțiunea F

$$Q = \frac{k F (p_d - p_s)}{\mu_t (L - x_a) + \mu_a x_a} \quad (307)$$

4) Durata deplasării contactului apă-țiței este foarte interesantă pentru proiectare în vederea aprecierii timpului necesar exploatării.

Astfel, timpul t în care contactul apă-țiței se deplasează de la x_0 la x_a se obține folosind ecuația (15) în care se introduce expresia vitezei din ecuația (306).

$$t = \frac{m}{k (p_d - p_s)} \left[(\mu_a - \mu_t) \frac{x_a^2 - x_0^2}{2} + \mu_t L (x_a - x_0) \right] \quad (308)$$

Durata totală T a deplasării contactului apă-țiței până la șirul de sonde infinit apropiate

(practic o galerie), ca în fig. 88, se obține din ecuația (308), pentru $x_a = L$

$$T = \frac{m}{2k (p_d - p_s)} [\mu_a (L^2 - x_0^2) + \mu_t (L - x_0)^2] \quad (309)$$

Pentru găsirea unei relații între poziția x_a , ocupată de suprafața contactului apă-țiței, în funcție de timp, s-a folosit ecuația (308) din care s-a obținut:

$$x_a = \frac{\mu_t}{\mu_t - \mu_a} L -$$

$$- \sqrt{\left(\frac{\mu_t}{\mu_t - \mu_a} L - x_0 \right)^2 + \frac{2k (p_d - p_s)}{m (\mu_t - \mu_a)} t} \quad (310)$$

Introducând această ecuație (310) în expresia vitezei, s-a determinat variația vitezei în funcție de timp

$$v = \frac{k (p_d - p_s)}{A} \quad (311)$$

$$\text{unde } A = \sqrt{[\mu_t L - (\mu_s - \mu_a) x_0] - \frac{2k (p_d - p_s)}{m} (\mu_t - \mu_a) t}$$

5) Concluzii și observații. Din ecuațiile obținute, se pot remarca următoarele caracteristici ale înaintării contactului apă-țiței:

α) În ecuația (75) a fluidelor incompresibile, presiunea p depindea numai de poziția x în mediul poros, pe cînd în cazul contactului apă-țiței, presiunea depinde și de poziția x_a ce o ocupă la un moment dat acest contact.

β) Viteza spre deosebire de cazul fluidelor incompresibile, tratat la capitolul IV, este în acest caz variabilă de timp. Ca urmare și debitul, cu toate că presiunile p_d și p_s sînt constante, depinde de poziția momentană contactului apă-țiței deci de timp.

Din ecuația (311) se observă că pentru $\mu_t > \mu_a$, prin creșterea lui x_a se mărește, viteza și respectiv debitul. Dacă însă $\mu_t < \mu_a$, atunci prin creșterea în timp a lui x_a (avansarea contactului apă-țiței) viteza și debitul se micșorează.

γ) Timpul t și T de avansare a contactului apă-țiței se observă că este direct proporțional cu porozitatea și invers proporțional cu permeabilitatea k și cu diferența de presiune $p_d - p_s$.

δ) Din ecuația (311) se vede că variația vitezei cu timpul este în funcție de raportul viscozităților μ_a și μ_t și anume: dacă $\mu_a > \mu_t$, atunci valorile vitezei scad, dacă

timpul t crește, și dacă $\mu_a < \mu_t$ valorile vitezei cresc.

b) Curgerea radial-plană. În cazul unei curgeri radial-plane se consideră un zăcămint, care într-o secțiune orizontală se prezintă ca în fig. 89. Zăcămintul are în condiții inițiale

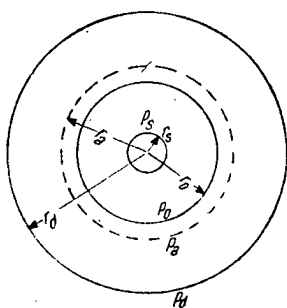


Fig. 89. Secțiune orizontală printr-un strat în cazul deplasării contactului apă-țiței la o curgere radial-plană.

două zone, o zonă de apă cuprinsă între r_c și r_0 și o zonă de țiței cuprinsă între r_0 și r_s . Intrucit la conturul r_c lucrează o presiune p_c și la sonda de rază r_s , amplasată în centrul conturului de alimentare, lucrează o presiune p_s , sub acțiunea diferenței de presiune, $p_d - p_s$,

contactul apă-țiței se deplasează spre centrul conturului ocupînd diverse poziții r_a . La contactul circular apă-țiței de rază r_a există o presiune p_a și o viteză de deplasare a acestuia v_a .

1) Distribuția presiunii. Folosindu-se ecuațiile (90) și (91) obținute la capitolul IV, se consideră curgerea separat pentru fiecare din cele două zone. În acest fel, se stabilește distribuția presiunii în zonele amintite.

Ținînd seama de faptul că fluidele (apă și țiței) sînt incompresibile și admițînd continuitatea curgerii la suprafața de contact, se obține distribuția presiunii pentru fiecare zonă în parte, în funcție de diferența totală de presiune $p_d - p_s$.

Presiunea p_a în zona de apă, la o distanță r de centrul conturului de alimentare este:

$$p_a = p_d - \frac{\mu_a (p_d - p_s)}{\mu_t \ln \frac{r_a}{r_s} + \mu_a \ln \frac{r_d}{r_a}} \cdot \ln \frac{r_d}{r} \quad (312)$$

Presiunea p_t în zona de țiței la o distanță r de centrul conturului de alimentare este:

$$p_t = p_s + \frac{\mu_t (p_d - p_s)}{\mu_t \ln \frac{r_a}{r_t} + \mu_a \ln \frac{r_d}{r_a}} \cdot \ln \frac{r}{r_s} \quad (313)$$

2) Distribuția vitezei. Ținînd seama de legea lui Darcy (25) și introducînd

valoarea presiunii din ecuațiile (312) și (313), se obține distribuția vitezei sub forma

$$v = - \frac{k (p_d - p_s)}{\mu_t \ln \frac{r_a}{r_s} + \mu_a \ln \frac{r_c}{r_a}} \cdot \frac{1}{r} \quad (314)$$

3) Ecuația debitului. Ținînd seama că suprafața de curgere este egală cu $2\pi r h$ și înmulțind această suprafață cu viteza din ecuația (314), se obține ecuația debitului sub forma

$$Q = \frac{2\pi k h (p_d - p_s)}{\mu_t \ln \frac{r_a}{r_s} + \mu_a \ln \frac{r_d}{r_a}} \quad (315)$$

4) Durata deplasării contactului apă-țiței. Pentru determinarea timpului t , în care contactul apă-țiței se deplasează de la poziția inițială r_0 la o poziție r (în drumul acestuia către gaura de sondă) se folosește ecuația (15), în care în locul vitezei se introduce expresia din ecuația (314) și în felul acesta rezultă

$$t = \frac{m}{2k(p_d - p_s)} \left[(\mu_a \ln r_d - \mu_t \ln r_a)(r_0^2 - r_a^2) + (\mu_t - \mu_a)(r_0^2 \ln r_0 - r_a^2 \ln r_a) - \frac{\mu_t - \mu_a}{2}(r_0^2 - r_a^2) \right] \quad (316)$$

Timpul T în care contactul apă-țiței se deplasează din poziția inițială r_0 pînă la gaura de sondă r_s , se determină din ecuația (316) pentru $r_a = r_s$.

$$T = \frac{m}{2k(p_d - p_s)} \left[(\mu_a \ln r_d - \mu_t \ln r_s)(r_0^2 - r_s^2) + (\mu_t - \mu_a)(r_0^2 \ln r_0 - r_s^2 \ln r_s) \times \frac{\mu_t - \mu_a}{2}(r_0^2 - r_s^2) \right] \quad (317)$$

5) Concluzii și observații. a) Spre deosebire de ecuațiile (90) pentru fluidele incompresibile, se observă că presiunea variază cu deplasarea suprafeței de contact apă-țiței. Aceasta înseamnă că presiunea variază în timp și că procesul de curgere este nestaționar.

β) Se observă din relațiile (312) și (313), că pentru aceleași valori ale razei, dacă $\mu_t > \mu_a$, gradientul de presiune în zona de țiței este mai mare decît în zona de apă, deci distribuția presiunii prezintă o discontinuitate la contactul apă-țiței.

γ) Din ecuația (315) se vede că pentru $\mu_t > \mu_a$, debitul sondei crește cu micșorarea lui r_a , (adică odată cu avansarea contactului apă-țiței spre gaura de sondă).

b. Teoria hidrodinamică a formării conurilor de apă

1. Generalități. Problema formării conurilor de apă se pune foarte adesea în șantiere, în

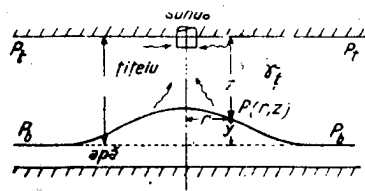


Fig. 90. Secțiune verticală ce reprezintă formarea unui con de apă.

legătură cu inundarea sondelor de către apa din talpă.

În condiții statice apa se află separată gravitațional sub zona de țitei, dar în condiții

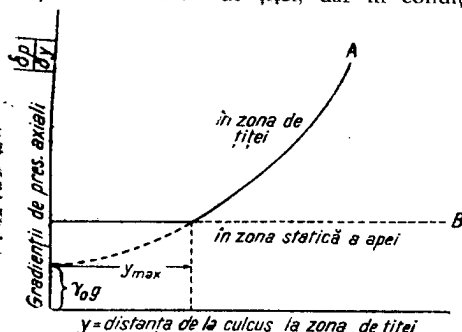


Fig. 91. Diagrama condițiilor de echilibru în cazul formării conului de apă.

dinamice datorită unor presiuni diferențiale de exploatare Δp prea mari, apa din talpă pătrunde în sondă în locul țiteiului. Tratarea analitică a problemei în condiții dinamice este foarte dificilă așa încît se vor impune o serie de condiții simplificatoare. Se admite că la un moment dat este posibil ca, datorită diferenței de presiune, apa să pătrundă în sondă. Considerînd în fig. 90, un punct p de coordonate r și z în care presiunea este $p(r, z)$, și ținînd seama de greutatea specifice γ_t și γ_a (a țiteiului și a apei), se va scrie condiția echilibrului static, la care se adaugă presiunea coloanei de apă

$$p(r, z) + \gamma_a g(h - z) = p_b$$

$$\therefore p(r, z) + \gamma_a g y = p_b \quad (318)$$

Dacă ar trebui să se țină seama de condițiile echilibrului dinamic, problema devine mai dificilă; în cazul de față se admite valabilă ecuația lui Laplace, iar funcția $p(r, z)$ reprezintă distribuția presiunii în zona de țitei, neglijîndu-se existența conului de apă.

Pentru a avea echilibrul static este necesar ca gradientul de presiune din zona de țitei să-și facă echilibrul cu gradientul gravitației ce lucrează asupra conului. Echilibrul acesta este deranjat dacă gradientul de presiune devine mai mare, respectiv contactul apă-țitei este mai apropiat de sondă.

Faptul că acești gradienti de presiune din zona de țitei cresc în imediata vecinătate a sondei, se poate ilustra într-o diagramă ca în fig. 91. La Y_{max} creșterea gradientului de presiune duce la o depășire a gradientului gravitației și în acest caz apa pătrunde în sondă.

2. Calculul analitic. Folosind ecuația (318) se poate scrie că diferența de presiune Δp este, (introducînd potențialul Φ),

$$\Delta \Phi = \Phi - \Phi_s = \Phi - \frac{k}{\mu} p_s (z = 0)$$

$$\Delta p = p_t - p_s = p_b - \gamma_t g h - p_s \quad (319)$$

încît Δp care reprezintă creșterea de presiune între sondă și punctul P , poate apare sub forma

$$\Delta \Phi = \frac{k}{\mu} \Delta p - \frac{k}{\mu} g \Delta \gamma (h - z) \quad (320)$$

Se observă însă, că, pentru valori mari a lui r ecuația devine

$$\frac{\Delta \Phi(r, z)}{(\Delta \Phi)_d} = 1 - \frac{g \Delta \gamma}{\Delta p} h \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (321)$$

Soluția se poate obține prin reprezentarea

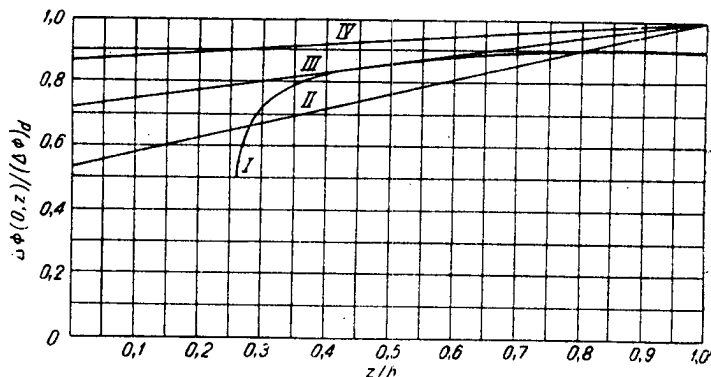


Fig. 92. Soluția grafică pentru obținerea echilibrului unui con de apă.

grafică a ecuației (321). După cum rezultă din fig. 92, unde curba I reprezintă partea stîngă a ecuației, iar curbele II, III și IV, partea dreaptă pentru trei valori ale lui Δp , se poate vedea că există următoarele soluții:

— Pentru primul punct al intersecției curbelor I și II, există posibilitatea ca potențialul dintre sondă și un punct oarecare să fie mai mare decât cel de pe contur și atunci conul de apă este atras spre gaura sondei.

— La al doilea punct de intersecție al curbelor I și II, există un echilibru stabil și sub acest punct nu există tendința de atragere a conului de apă în gaura de sondă.

— La intersecția curbei I și III nu există decât o singură soluție, iar deasupra acestui punct nu mai există nici o soluție.

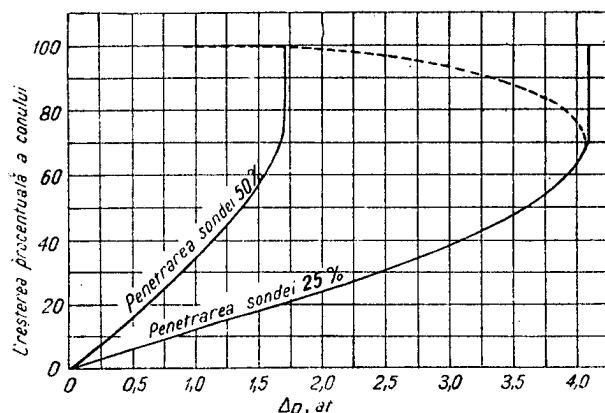


Fig. 93. Variația conului de apă în funcție de Δp pentru diverse grade de străpungere (penetrări) ale sondei. (grosimea stratului $h = 37,5$ m; $r_s = 7,5$ cm; $r_d = 150$ m; diferența de greutate specifică $\Delta \gamma = 0,3$ g/cm³).

Punctul de intersecție al acestor două curbe reprezintă deci un punct critic de echilibru limită.

Întrucât problema cea mai interesantă în cazul conurilor de apă este fixarea diferențelor

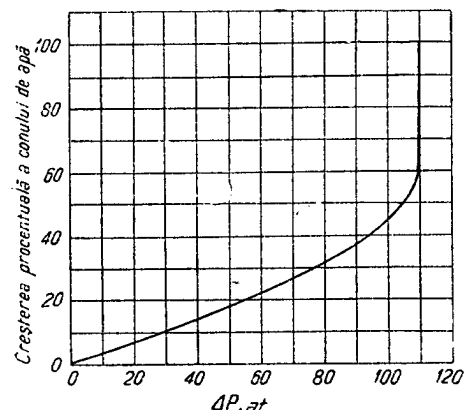


Fig. 94. Variația conului de apă în cazul unei sonde ce atinge coperișul stratului productiv, în funcție de diferența de presiune Δp ($h = 37,5$ m; $r_s = 7,5$ cm; $r_d = 150$ m; diferența de greutate specifică $\Delta \gamma = 0,3$ g/cm³).

de presiune de lucru a sondeilor, s-au trasat o serie de curbe ca în fig. 93 în care este redată

creșterea procentuală a conului pentru diverse diferențe de presiuni în cazul a două sonde: o sondă cu grad de străpungere $\bar{h} = 50\%$, și alta cu grad de străpungere $\bar{h} = 25\%$. Se constată, că pentru o sondă ce a străpuns 50% din grosimea totală a stratului productiv, diferența de presiune este de 1,5 at, în timp ce pentru sonda ce a străpuns 25% din grosimea totală a stratului productiv, presiunea diferențială maximă este de 4 at. Pe acest criteriu s-a ajuns la concluzia că în cazul existenței unei ape de talpă, nu se poate exploata stratul respectiv decât respectind o presiune diferențială limită. De asemenea, se vede că, cu cât o sondă a străpuns un strat productiv pe o grosime mai mică, cu atât diferența de presiune la care poate fi exploatată sonda, este mai mare. În fig. 94 se vede că pentru cazul unei sonde ce a atins numai coperișul stratului, diferența de presiune este de 110 at. În fig. 95 este redată diferența maximă de presiune fără formarea conului de apă în raport cu gradul de pătrundere al sondei, pentru diverse grosimi de strat cuprinse între 4,5 m și 60 m.

Pentru a se putea căpăta o imagine asupra aspectului suprafeței de contact apă-țiței, în fig. 96 A este ilustrată creșterea conului de apă în raport cu distanța de la centrul sondei pentru diverse diferențe de presiune Δp între 0,5–1,5 atm. Pentru o grosime de strat $h = 37,5$ m și pentru o diferență de greutate specifică apă-țiței $= 0,3$ gr/cm³.

Pentru a afla cantitatea de țiței \bar{Q} care poate fi extrasă din sondă pînă în momentul cînd conul apei a ajuns la fundul sondei, se utilizează relația

$$\bar{Q} = \alpha m h^3 \frac{k'_0}{k_0} D \quad (322)$$

în care α reprezintă produsul dintre coeficientul de extracție și coeficientul de volum al țițeiului, m — porozitatea stratului, k'_0 și k_0 — permeabilitățile pe direcția orizontală și verticală și D un coeficient de corecție ce se găsește în fig. 96 B, în funcție de gradul de pătrundere al sondei \bar{h} .

c. Teoria hidrodinamică a proceselor de spălare cu apă sau gaze

1. Generalități. Operațiile de spălare cu apă sau gaze sînt acele operații în care se injectează în zăcămint gaze sau apă, în vederea obținerii unei extracții mai mari de țiței, atunci

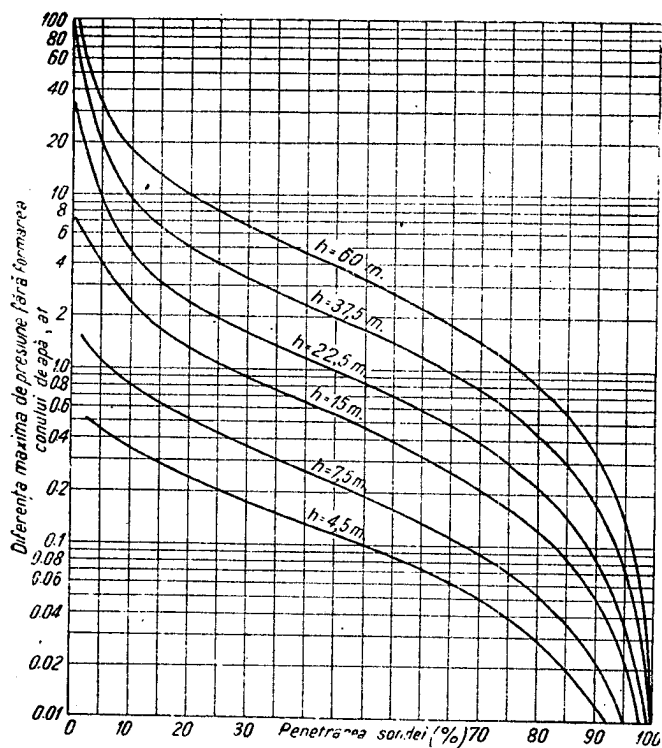


Fig. 95. Diferența de presiune maximă fără formarea conului de apă reprezentată în funcție de penetrarea sondei pentru diverse grosimi de strat ($r_s = 7.5$ cm; $r_d = 150$ m; diferența de greutate specifică $\Delta\gamma = 0.39/\text{cm}^3$).

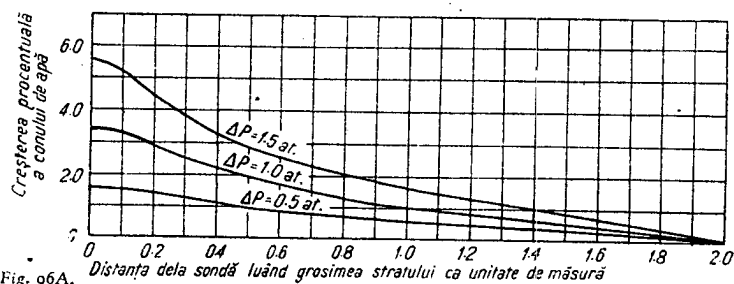


Fig. 96 A.

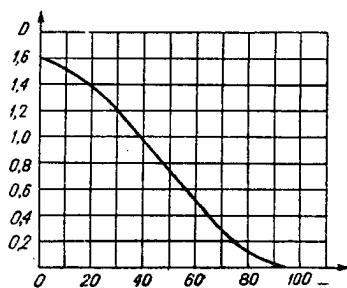


Fig. 96 B. Creșterea procentuală a conului de apă în funcție de distanța de la sondă, luând grosimea stratului drept unitate ($h = 37.5$ m; $r_s = 7.5$ cm; $r_d = 150$ m; diferența de greutate specifică $\Delta\gamma = 0.3 \text{ cm}^3$).

cind energia zăcămintului este aproape epuizată. Ținând seama că apa sau gazele pot fi injectate în zăcămint și în cazul că energia zăcămintului poate asigura singură exploatarea, se face următoarea clasificare:

— Dacă fluidele introduse de la suprafață în zăcămint au scopul de a menține constantă presiunea zăcămintului în timpul exploatarei, operația se numește *menținerea presiunii*.*)

— Dacă fluidele introduse de la suprafață în zăcămint au scopul de a spăla hidrocarburi rămase într'un zăcămint epuizat energetic atunci operația se numește *recuperare secundară*.

Diferențele între recuperarea secundară și menținerea presiunii din punct de vedere fizic, sînt următoarele:

— În cazul recuperării secundare saturația în țitei s_t a zăcămintului, este în general mai mică decît în cazul menținerii presiunii.

— Viscositatea țiteiului μ_t este în general mai mare în cazul recuperării secundare, iar coeficientul de volum al țiteiului este mai mic.

— Tensiunea interfacială între apă și țitei este în general mai mică în cazul recuperării secundare, iar distribuția presiunii și a saturației este mai puțin uniformă în cazul zăcămintului asupra căruia urmează a se aplica un proces de recuperare secundară.

Consecințele acestor condiții de zăcămint, implică următoarele dezavantaje pentru operațiile de recuperare secundară:

— Saturația în gaze libere este mai mare, întrucît saturația în țitei este mai mică.

— Creșterea viscozității micșorează viteza de înaintare a țiteiului spre gaura de sondă.

— Distribuția neuniformă a saturației și presiunii în zăcămint favorizează canalizarea în direcții nedorite a fluidelor injectate.

Singurul avantaj în cazul operațiilor de recuperare secundară, față de operațiile de menținere a presiunii, este că presiunile de injecție fiind mai mici, introducerea fluidelor în zăcămint se poate face uneori fără pompe sau compresoare.

Diferența între recuperarea secundară și menținerea presiunii, din punct de vedere al distribuției sondelor, constă în faptul că:

— În cazul menținerii presiunii, sondele de injecție sînt amplasate la limitele conturului și anume sus pe structură pentru injecția de gaze, și jos pe structură în cazul injecției de apă (injecție extraconturală)

— În cazul recuperării secundare, sondele de injecție pot fi distribuite și pe întreaga suprafață a zăcămintului (injecție intraconturală), astfel încît sonda de injecție să fie înconjurată de sonde de producție.

2. Spălarea cu apă. a) Sisteme de amplasare a sondelor, în vederea operațiilor. Sistemele de amplasare a sondelor reprezintă un

aranjament geometric ce cuprinde sondele de injecție și sondele de exploatare (de reacție). Această rețea geometrică poate avea una din următoarele forme:

1) Sistem de spălare cu rețea în linie directă. Acest sistem apare în fig. 97 și 98, în care se vede alternarea între

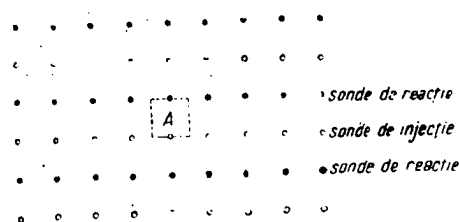


Fig. 97. Așezarea sondelor de injecție și reacție în cazul liniei directe.

șirurile de sonde de injecție și șirurile de sonde de reacție. Distanța între șirul de sonde de injecție și de reacție este notat cu d , iar distanța între două sonde cu a . Caracteristica

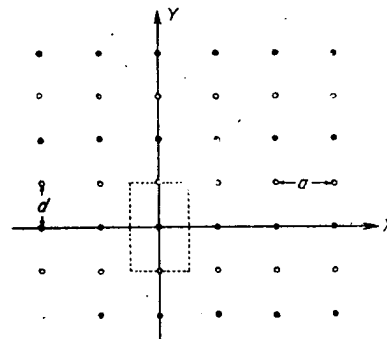


Fig. 98. Sistemul de spălare în linie directă încadrat într-un sistem de coordonate carteziene.

acestei rețele este că de-a lungul axei X sau de-a lungul axei Y șirurile de sonde sînt paralele între ele, pentru fiecare sondă de injecție corespunzînd o sondă de reacție.

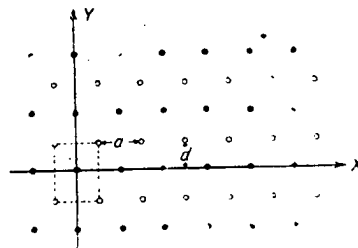


Fig. 99. Sistem de spălare în linie alternată încadrat într-un sistem de coordonate carteziene.

2) Sistem de spălare cu rețea în linie alternată. Sistemul cu rețea în linie alternată din fig. 99 este caracterizat

*) Dacă injecția de fluide urmărește refacerea presiunii de zăcămint, operația se numește refacerea presiunii.

prin faptul că dintr-o sondă de injecție sint alimentate două sonde de reacție, în timp

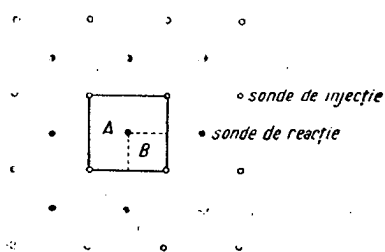


Fig. 100. Sistem de spălare pătratic.

ce la sistemul în linie directă, pentru fiecare sondă de injecție corespunde o sondă de reacție.

3) Sistem de spălare cu rețea pătratică. Această rețea este un caz particular al rețelei în linie alternată și se poate vedea în fig. 100, în care prin patru sonde de injecție se împinge țigăii spre o sondă de reacție și invers. Distanța între două șiruri de sonde de injecție și reacție este d iar între două sonde de injecție este $a = 2d$.

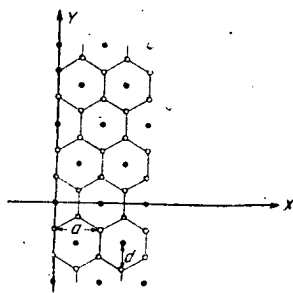


Fig. 101. Sistem de spălare exagonal.

4) Sistemul de spălare cu rețea exagonală. Rețeaua exagonală se poate vedea în fig. 101, se caracterizează prin faptul că spre o sondă de reacție țigăii este împins spre șase sonde de injecție și invers.

b) Procesul hidrodinamic al spălării cu apă în ipoteza fenomenului staționar de curgere.

Considerând fluidele ca incompresibile se poate admite că procesul spălării are loc ca un fenomen staționar de curgere și că volumul de fluid injectat va trebui să corespundă cu volumul de fluid extras prin sondele de reacție.

Utilizându-se funcțiunile conjugate și considerându-se sondele ca niște surse, s-au putut obține valorile distribuției presiunii și a debitului pentru fiecare sistem în parte.

1) Capacitatea de producție a sistemelor de spălare cu apă.
α) Sistemul în linie directă. Pentru sistemul în linie directă s-a găsit în cazul când d este distanța unui șir de sonde infinit, față de axa X , iar a distanța dintre sondele din același șir, că distribuția presiunii are valoarea:

$$p(x,y) = \frac{Q\mu b}{4\pi kh} \ln \left[\operatorname{ch} \frac{2\pi(y-d)}{a} - \cos \frac{2\pi x}{a} \right] \quad (323)$$

Printr-o serie de simplificări s-a determinat valoarea presiunii p_i corespunzătoare distanței r_i ca fiind egală cu:

$$p_i = \frac{Q\mu b}{4\pi kh} \ln 2 \operatorname{sh}^2 \frac{\pi r_i}{a} \quad (324)$$

Valoarea capacității relative de producție este egală cu:

$$Q = \frac{2\pi kh \Delta p / \mu b}{\ln \frac{\operatorname{sh}^4 \pi d/a \cdot \operatorname{sh} 3\pi d/a}{\operatorname{sh}^2 \pi r_s/a \cdot \operatorname{sh}^3 2\pi d/a}} \quad (325)$$

în cazul când $1 > \frac{d}{a} > 1/4$.

Pe de altă parte, dacă $\frac{d}{a} > 1$, ecuația (325)

se poate simplifica la forma:

$$Q = \frac{2\pi kh \Delta p / \mu b}{\pi \frac{d}{a} - 2 \ln \operatorname{sh} \frac{\pi r_s}{a}} = \frac{2\pi kh \Delta p / \mu b}{\frac{d}{a} - 1,17 + \frac{2}{\pi} \ln \frac{a}{r_s}} \quad (326)$$

β) Sistemul de linie alternată. Pentru acest sistem s-a găsit valoarea diferenței de presiune Δp între sonda de injecție și sonda de reacție ca fiind:

$$\Delta p = \frac{Q\mu b}{2\pi kh} \left[\ln \frac{\operatorname{ch}^4 \frac{\pi d}{a} \cdot \operatorname{ch}^3 \frac{3\pi d}{a}}{\operatorname{sh}^2 \pi r_s/a \cdot \operatorname{sh}^4 \frac{2\pi d}{a} \cdot \operatorname{sh} 4\pi d/a} + \sum_{m=2}^{\infty} \ln \frac{\operatorname{ch} (2m-1) \pi d/a \cdot \operatorname{ch}^3 (2m+1) \pi d/a}{\operatorname{sh}^3 2m \pi d/a \cdot \operatorname{sh} 2(m+1) \pi d/a} \right] \quad (327)$$

Pentru cazul $\frac{d}{a} > 1/2$ ecuația debitului devine:

$$Q = \frac{2\pi kh \Delta p / \mu b}{\ln \frac{\operatorname{ch}^4 \pi d/a \cdot \operatorname{ch}^3 3\pi d/a}{\operatorname{sh}^2 \pi r_s/a \cdot \operatorname{sh}^4 2\pi d/a \cdot \operatorname{sh} 4\pi d/a}} \quad (328)$$

Dacă $d/a > 1$ ecuația (338) poate fi înlocuită prin ecuația (335). Aceasta arată că dacă distanța între șirurile de sonde este mai mare decât distanța între două sonde, atunci nu mai există practic nici o diferență pentru debit între sistemul cu linii alternate și cel cu linii directe.

În fig. 102 și 103, sînt date valorile comparative ale debitelor în funcție de raportul d/a și în funcție de distanța d între șiruri. Se vede astfel din fig. 102 că capacitatea

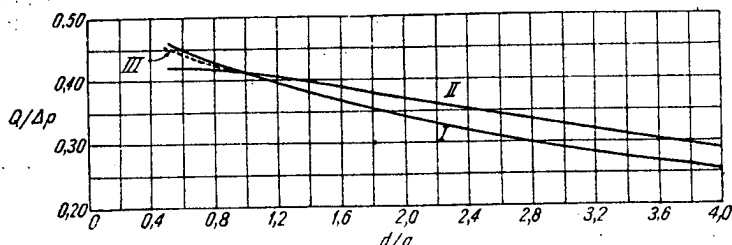


Fig. 102. Variația raportului $Q/\Delta p$ cu raportul d/a . Curba I — sistem în linie directă în cazul $a = 200$ m și curba II — pentru cazul $d = 200$ m, curba III — pentru sistem de linie alternată $a = 200$ m.

relativă de producție este mai mare pentru linia directă, decât pentru linia alternată în aceleași condiții de variație ale raportului d/a . Pe de altă parte, în fig. 103, se vede că din cele trei sisteme (linie directă, pătratic și exagonal) capacitatea de producție a primelor două este

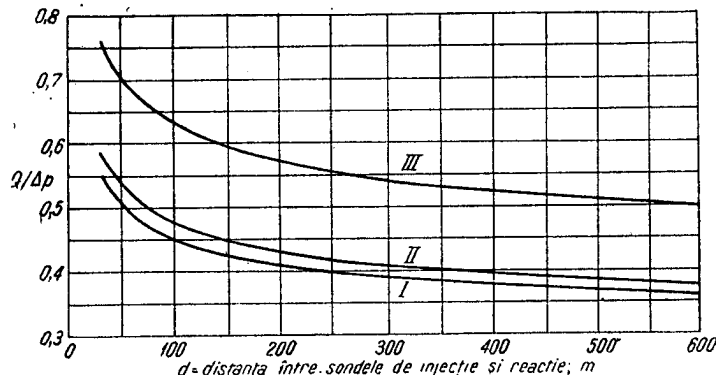


Fig. 103. Variația debitului cu distanța d între șirurile de sonde. Curba I — spălare în linie directă ($d = a$) curba II — sistem pătratic, curba III — sistem exagonal.

apropiată, iar capacitatea de producție a sistemului exagonal este mult mai mare decât a celorlalte două.

γ) Sistem pătratic. Sistemul pătratic poate fi considerat ca un caz particular al sistemului în linie alternată, cu mențiunea $d/a = 1/2$. În acest fel se obține din ecuația (328) valcarea debitului ca fiind

$$Q = \frac{\pi k h \Delta p / \mu b}{\ln d/r_s - 0,6190} \quad (329)$$

δ) Sistem exagonal. În cazul sistemului exagonal de spălare numărul sondelor de injecție față de numărul sondelor de reacție se află în raportul de $1/2$ sau $2/1$. Expresia debitului este:

$$Q = \frac{4\pi k h \Delta p / \mu b}{3 \ln d/r_s - 1,7073} \quad (330)$$

2) Eficacitatea spălării cu apă (coeficient de inundare). În cazul curgerii staționare analizate, pe lângă capacitatea de producție s-a introdus și noțiunea de coeficient de inundare. Aceasta reprezintă procentul din suprafața totală a unei rețele de sonde ce a fost inundată de apă, pînă în momentul cînd primele particule de apă

au ajuns la gaura sondei de reacție.

Faptul că nu toată suprafața a fost inundată de apă, se explică prin distribuția potențialului în cadrul rețelei. Astfel, pentru fiecare rețea eficacitatea este diferită.

α) Sistem de linie directă. Pentru raportul $d/a > 1/2$ s-a găsit un coeficient de inundare redat prin ecuația

$$I = \frac{1}{\pi \frac{d}{a} \left(\operatorname{ch} \frac{2\pi d}{a} - 2 \right)} \times \left(\operatorname{ch} \frac{2\pi d}{a} \cdot \ln \operatorname{ch} \frac{\pi d}{a} - 0,6932 \operatorname{sh} \frac{2\pi d}{a} \right) \quad (331)$$

iar pentru raportul $d/a \geq 1,5$ s-a obținut o formă mai simplă

$$I \approx 1 - 0,441 \frac{a}{d}$$

β) Sistem de linie alternată. Pentru sistemul de linie alternată problema este mai complicată prin faptul că drumul parcurs de la sonda de injecție la sonda de reacție nu are loc de-a lungul axei de coordonate Y încît eficacitatea este exprimată prin următoarea expresie a coeficientului de inundare:

$$I = \frac{\mu b Q (1 + 4\bar{d}^2)}{2k\pi h a d} \int_0^{\frac{a}{2}} \frac{dx}{\frac{\partial p}{\partial x} + 2d \frac{\partial p}{\partial y}} \quad (332)$$

în care:

$$\bar{d} = \frac{d}{a} \quad (333)$$

În cazul particular cînd $d = 1/2$, care corespunde de fapt cu sistemul pătratic, ecuația (342) devine:

$$I\left(\bar{d} = \frac{1}{2}\right) = 0,715. \quad (334)$$

γ) Sistemul exagonal. În cazul sistemului exagonal, aplicînd ecuațiile pentru distribuția presiunii, se găsește valoarea coeficientului de inundare ca fiind egală cu:

$$I = 0,740. \quad (335)$$

În fig. 104 este reprezentată variația acestui coeficient în funcție de raportul d/a , în cazul liniei directe și liniei alternate. Se constată că la valori mai mari decît 2 ale raportului d/a valoarea coeficientului de inundare nu diferă prea mult pentru cele două sisteme.

3) Timpul de avansare a apei injectate. Pe baza valorilor eficacității, se poate stabili timpul minim în cazul unei curgeri staționare, în care fluidul injectat ajunge la gaura sondei de reacție. Considerînd V volumul rețelei elementare pentru fiecare sondă de injecție și m porozitatea, se obțin următoarele valori:

α) Sistem în linie directă pentru $d/a > 1,5$, valoarea timpului t este egală cu

$$t = \frac{2dam}{Qb} \left(1 - 0,441 \frac{a}{d}\right) \quad (336)$$

în care \bar{m} este fracțiunea din spațiul de pori ocupată de fluidul injectat (aci apa).

β) Sistem pătratic, valoarea timpului este:

$$t = \frac{1,430 d^2 \bar{m}}{Qb} \quad (337)$$

γ) Sistem exagonal, timpul în care apa de la sondele de injecție intră în sondele de reacție este,

$$t = \frac{1,992 d^2 \bar{m}}{Qb} \quad (338)$$

în care Q este debitul pe fiecare sondă în condiții de suprafață și d distanța între sonde de injecție și sonde de reacție, b coeficientul de volum.

4) Distribuția presiunii. Distribuția presiunii diferă de la un sistem la celălalt și acesta condiționează valorile debitului sondelor de reacție. Distribuția presiunii

poate fi calculată analitic, însă se poate determina mai convenabil prin modele electrice sau electrolitice, în care distribuția potențialului este guvernată tot de ecuația lui Laplace.

α) Linie directă. În fig. 105 se vede că în cazul sondelor așezate în această rețea, liniile izobare sînt concentrate în jurul sondelor, avînd în apropierea lor un aspect circular.

β) Linie alternată. Pentru cazul $d/a > 1,5$, liniile izobare și liniile de curent (punctate) sînt determinate în același mod și se observă și aici concentrarea izobarelor în jurul sondelor fig. 106.

Faptul că gradientii de presiune sînt mai mari în jurul sondelor și că izobarele au un aspect circular, înseamnă că curgerea este aproximativ radială în acel domeniu.

γ) Sistemul pătratic. În sistemul pătratic

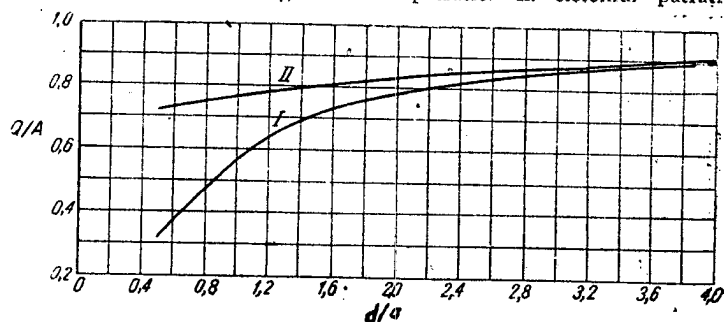


Fig. 104. Variația eficacității spălării în funcție de raportul (d/a) . Curba I — linie directă; curba II — linie alternată.

curgerea apare ca radială, pe aproape întreaga suprafață elementară de spălare. Gradientii

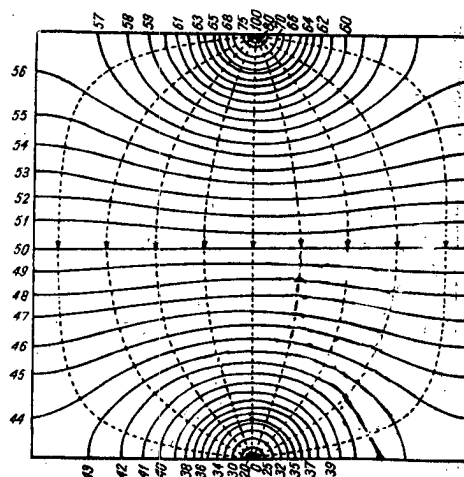


Fig. 105. Distribuția liniilor de curent (punctate) și liniilor echipotențiale (linii continue) în cazul curgerii staționare între două sonde la un sistem de spălare în linie directă.

de presiune sînt distribuiți mai concentrat în apropierea găurilor de sondă (fig. 107).

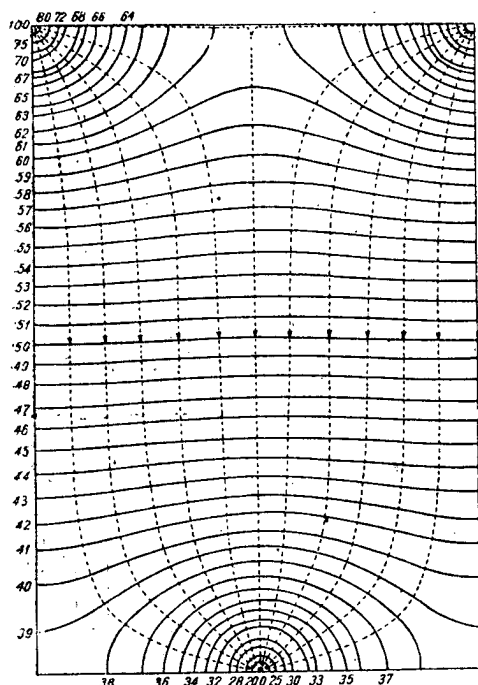


Fig. 106. Distribuția liniilor de curent (punctate) și liniilor echipotențiale (linii continue), între sondele de injecție și de reacție la curgerea staționară ce are loc în cadrul spălării cu apă în linie alternată.

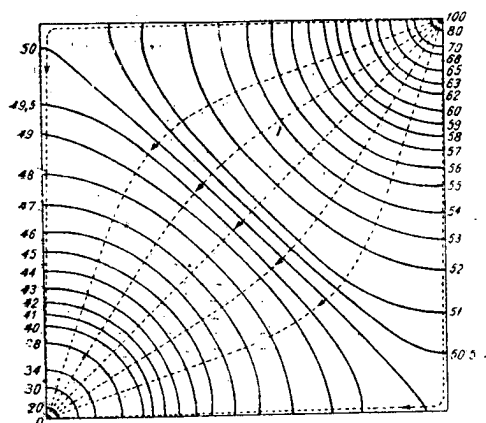


Fig. 107. Distribuția liniilor de curent (punctate) și liniilor echipotențiale (linii continue), între o sondă de injecție și o sondă de reacție în cazul sistemului pătratic de spălare cu apă.

8) Sistemul exagonal. În sistemul exagonal gradientii de presiune sînt mult mai mari în apropierea găurii de sondă și mult mai mari în jurul sondei de reacție (fig. 108).

5) Forma contactului apă-țiței. În timpul spălării cu apă, suprafața contactului apă-țiței nu păstrează aceeași formă

în timpul înaintării acesteia. Examinarea detaliată a formei contactului apă-țiței este foarte importantă pentru tratarea analitică a problemei spălării cu apă, din păcate însă, complexitatea calculelor nu permite studiul acestui contact decît în cazuri particulare.

Pornind de la faptul că particulele de fluid

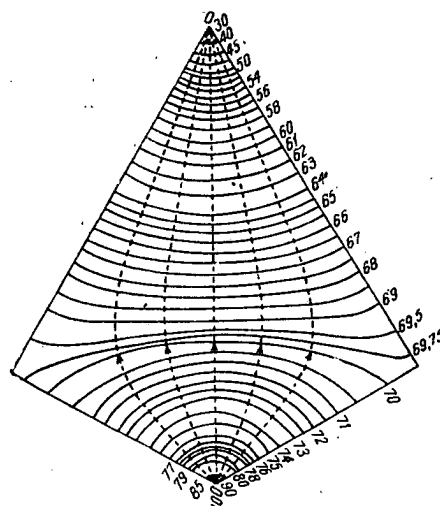


Fig. 108. Distribuția liniilor de curent (punctate) și liniilor echipotențiale (linii continue), între o sondă de injecție și o sondă de reacție în cazul sistemului exagonal de spălare cu apă.

la timpul t reprezintă o suprafață $F(x, y, z)$ și că potențialul vitezei este $\Phi(x, y, z)$, se poate arăta că funcția F trebuie să satisfacă ecuația diferențială,

$$\frac{\partial F}{\partial t} - \nabla \Phi \cdot \nabla F = 0 \quad (339)$$

Ținînd seama că presiunile sînt constante pe contur, s-au aplicat metodele curgerii potențiale și s-au obținut pentru curgerea dela un contur liniar de alimentare către o sondă următoarele expresii pentru potențial și linii de curent:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \frac{Q}{4\pi m} \ln \frac{x^2 + (y-d)^2}{x^2 + (y+d)^2} + \Phi_0 \\ \psi &= \frac{Q}{2\pi m} \operatorname{ctg} \frac{-2dx}{x^2 + y^2 - d^2} \end{aligned} \right\} \quad (340)$$

în care ψ reprezintă linia de curent, Φ reprezintă linia echipotențială, Φ_0 reprezintă potențialul la conturul de alimentare, Q debitul ce intră în sondă pe unitate grosime de strat și m fracțiunea din spațiul de pori ocupabilă din fluidul injectat. Timpul t pentru fiecare,

formă a liniilor de curent este dat de ecuația

$$t = \frac{2\pi\bar{m}d^2}{Q \sin^2 \xi} \left[\frac{\text{sh } \eta}{\cos \xi + \text{ch } \eta} - 2 \cotg \xi \cotg \frac{\xi}{2} \cdot \text{tg } h \frac{\eta}{2} \right] \quad (341)$$

în care

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{2\pi\bar{m}(\Phi_0 - \Phi)}{Q} \\ \xi &= \frac{2\pi\bar{m}\psi}{Q} \end{aligned} \right\} \quad (342)$$

Pe baza ecuațiilor (351) și (352) în fig. 109 în care d este unitatea de lungime, Q/\bar{m} este egal cu 2π și $\Phi_0 = 0,5$ s-a obținut că primele particule de fluid intră în sondă

la timpul $t = \frac{1}{3}$,

iar în sistemul corespunzător, acest timp t este egal cu

$$t = \frac{2\pi\bar{m}d^2}{3Q} \quad (343)$$

Suprafața totală spălată în timpul t este

$$A = \frac{Qt}{\bar{m}} = \frac{2\pi d^2}{3} \quad (344)$$

Se vede deci, în fig. 109, care este aspectul liniilor de curent și al frontului la timpul t , în cazul unui contur liniar de alimentare de la care țigeliul curge spre gaura de sondă.

În cazul unei sonde de injecție și al unei sonde de reacție așezate de-a lungul unei axe Y , distribuția potențialului este mult mai complicată și timpul are aspectul dat de relația:

$$t = \frac{2\pi\bar{m}d^2}{Q \sin^2 \xi} \left(\frac{\text{sh } \eta}{\text{ch } \eta + \cos \xi} - \frac{\text{sh } \eta_0}{\text{ch } \eta_0 + \cos \xi} - 2 \sec \xi \cotg \frac{\xi}{2} \text{tg } \frac{\eta}{2} \text{th } \frac{\eta}{2} + 2 \cot \xi \cotg \frac{\xi}{2} \text{th } \frac{\eta_0}{2} \right) \quad (345)$$

Pe baza acestei ecuații (355) s-au trasat linii de curent și linii echipotențiale din fig. 110. Timpul până când fluidul injectat atinge sondele de reacție este egal cu

$$t = \frac{4}{3} \frac{\pi\bar{m}d^2}{Q} \quad (346)$$

iar suprafața spălată în acest timp este

$$A = \frac{Qt}{\bar{m}} = \frac{4}{3} \pi d^2. \quad (347)$$

Ca în cazul fig. 109 se observă și în fig. 110 deformarea liniilor de curgere pe linia ce unește sondele de injecție cu cele de reacție. Pe de altă parte se observă că apa injectată păstrează un front circular până când acesta a avansat aproximativ la o treime din distanța între cele două sonde. Aceasta se poate explica prin caracterul general al curgerii, aproximativ radială în imediata apropiere a sondei de injecție.

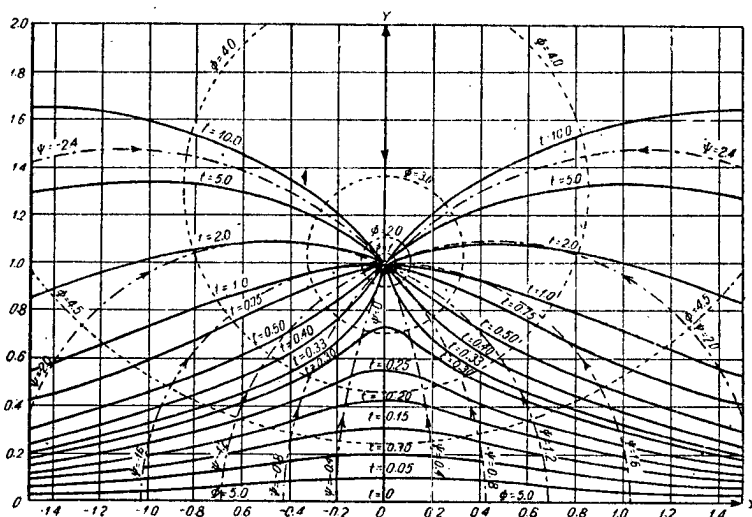


Fig. 109. Forma contactului în cazul unei curgeri staționare de la un contur de alimentare la o sondă (Φ = contant linii echipotențiale și Ψ = const. linii de curent).

Așa cum s-a menționat, problemele care nu ofereau condiții de simetrie, convenabile unei rezolvări analitice, au trebuit să fie soluționate prin modele electrice și electrolitice.

Experimentele făcute pe modele electrolitice sînt reproduse prin fotografii succesive în figurile 111, 112 și 113.

Rezultatele ce s-au obținut în fig. 111 coincid cu calculele analitice, ceea ce confirmă utilitatea practică a modelelor electrolitice pentru studiul practic al avansării contactului apă-țigeli în procesul de spălare cu apă.

c) Procesul hidrodinamic al spălării cu apă ca fenomen tranzitoriu de curgere 1. Generalități și descrierea fenomenului tranzitoriu. În procesul de injecție fenomenul nu este staționar de la începutul acestui proces, apa introdusă în sonda de injecție trebuind mai întâi să umple spațiile de pori lipsite de lichid și saturați cu gaze din jurul sondei de injecție. Intervalul de

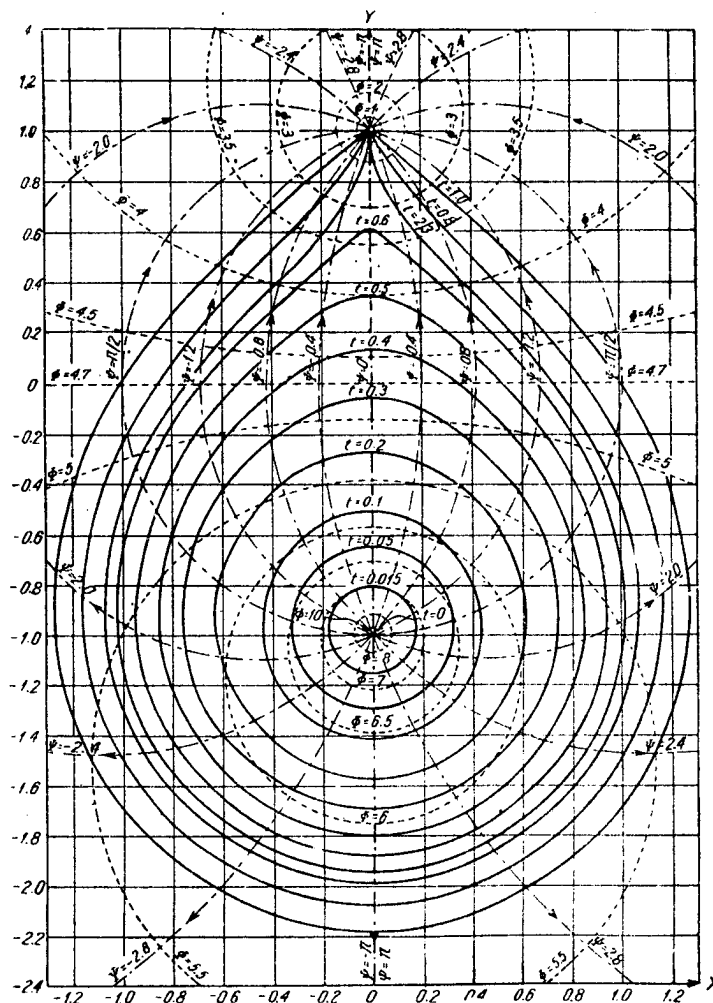


Fig. 110. Forma contactului apă-țitei de la o sondă de injecție la o sondă de reacție, în cazul unei curgeri staționare ($\Phi = \text{const.}$ linii echipotențiale și $\Psi = \text{const.}$ linii de curent).

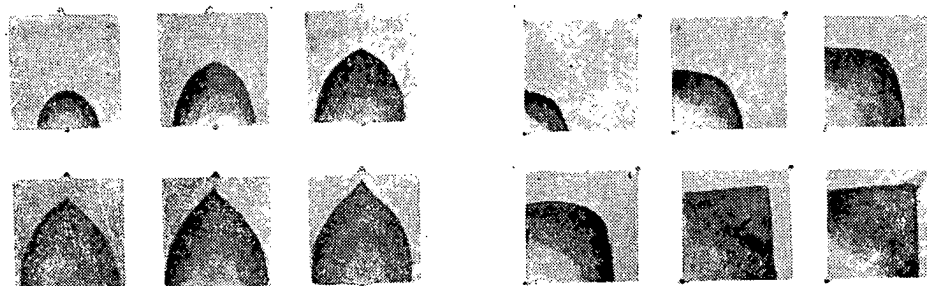


Fig. 111. Reprezentarea înaintării contactului apă-țitei obținută pentru sistemul în linie directă prin modelul electrolic.

Fig. 112. Reprezentarea înaintării contactului apă-țitei obținută pentru sistemul pătratic prin modelul electrolic.

timp, pînă cînd apa și țițeiul formează o masă de fluid incompresibil cu masa de țiței, constituie perioada tranzitorie a procesului de injecție.

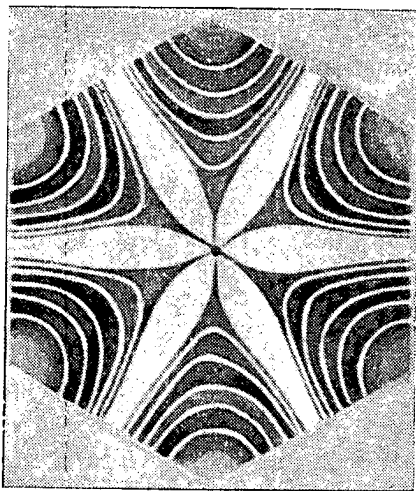


Fig. 113. Representarea înaintării contactului apă-țiței obținută pentru sistemul exagonal prin modelul electrolitic.

Condițiile fizice ale acestei perioade se explică astfel: în fig. 114, printr-o sondă de injecție de rază r_s se introduce apă în zona de țiței. Apa ocupă un spațiu circular de o rază r_0 . Această apă în perioada de «umplere» dezlocuiește o cantitate de gaze și micșorează saturația în țiței, încît în zona de rază r_0 se află

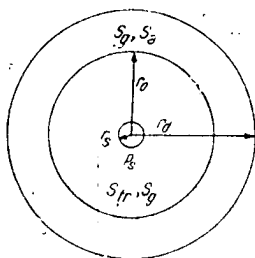


Fig. 114. Secțiunea orizontală printr-un strat în cazul injecției de apă.

apa plus o cantitate de țiței rezidual S_{tr} , o saturație în gaze S_g , și o saturație S_a în apă interstitală. În zona de țiței cuprinsă între raza r_0 și raza r_d se află țițeiul împins de apă și în același timp o saturație în gaze S_g și o saturație în apă S_a . Pe aceste considerente presupunînd saturația inițială în țiței, S_{ti} , ca fiind uniform distribuită în mediul poros, se poate scrie următoarea relație de bilanț material

$$\begin{aligned} (r_d^2 - r_0^2) (1 - S_a - S_g - S_{tr}) = \\ = (r_0^2 - r_s^2) (S_{ti} - S_{tr}) \end{aligned} \quad (348)$$

Neglijînd r_s față de r_0 , ecuația (358) se poate scrie

$$\frac{r_d^2}{r_0^2} = \frac{1 - S_a - S_g - S_{tr}}{1 - S_a - S_g - S_{ti}} = \frac{m_a}{m_t} \quad (349)$$

în care m_a și m_t reprezintă fracțiunile din spațiul de pori disponibil pentru umplerea cu apă, respectiv țiței din zona de apă, respectiv din zona de țiței.

Volumul cumulativ V de apă injectată, dacă se consideră h grosimea stratului, este:

$$V = \pi h m_a (r_0^2 - r_s^2). \quad (350)$$

Presupunînd că debitul momentan de injecție Q ar reprezenta o situație analogă cu debitul obținut în ecuația (167) se poate scrie pentru cazul de față

$$Q = \frac{2\pi k_a h (p_{inj} - p_{st})}{\ln r_0/r_s + \alpha \ln r_d/r_0} \quad (351)$$

unde

$$\alpha = \frac{k_a \cdot \mu_t}{k_t \cdot \mu_a}$$

Între volumul cumulativ de apă injectată V , și debitul instantaneu Q , se poate scrie următoarea relație introducînd relațiile (349) și (350) în ecuația (351),

$$\begin{aligned} \ln \frac{V}{\pi h m_a r_s^2} = \\ = \frac{4\pi k_a h (p_{inj} - p_{st})}{Q \mu_a} + \alpha \ln \frac{m_t}{m_a} \end{aligned} \quad (352)$$

Se observă că există o legătură de inversă proporționalitate între $\ln V$ și $\frac{1}{Q}$. Pe acest considerent s-au stabilit relațiile pentru valorile adimensionale \bar{t} , \bar{q} , și \bar{V} , care reprezintă timpul, debitul instantaneu și volumul cumulativ în valori adimensionale.

Ecuația (351), redă condiția de bază a fenomenului tranzitoriu, în care țițeiul și apa ocupînd volume diferite în procesul de injecție, saturează suplimentar fracțiuni din spațiul de pori (m_t și m_a) diferite și întîlnesc permeabilități diferite.

Pentru a se putea ajunge de la relația (351) la relația (352), s-a presupus ca raportul $\frac{r_d}{r_0}$ este constant la un moment dat, considerînd fenomenul nestăionar în acest caz, ca o succesiune continuă de stări staționare. Tot din relația (352) se vede că pentru o valoare constantă a debitului Q , presiunea de injecție crește. Relațiile adimensionale pe baza ecuațiilor

(351) și (352) obținute pe considerentele arătate, sînt următoarele

$$\left. \begin{aligned} 1 + e^{1/\bar{Q}} \left(\frac{1}{\bar{Q}} - 1 \right) &= \\ &= \frac{4k_a t \Delta P}{\mu_a m_a r_s^2} \left(\frac{m_a}{m_t} \right)^\alpha \equiv \bar{t} \\ 1 + \bar{V} (\ln \bar{V} - 1) &= \frac{4k_a t \Delta P}{\mu_a m_a r_s^2} \left(\frac{m_a}{m_t} \right)^\alpha \equiv \bar{t} \end{aligned} \right\} \quad (353)$$

$$\bar{Q} = \frac{Q \mu_a}{4\pi k_a h \Delta P} \quad (354)$$

$$\bar{V} = \frac{V}{\pi h m_a r_s^2 \left(\frac{m_t}{m_a} \right)^\alpha} \quad (355)$$

sau

$$\ln \bar{V} = \frac{1}{\bar{Q}} \quad (356)$$

Reprezentînd grafic ecuațiile (353), (354) și (355) în fig. 115 se observă creșterea volu-

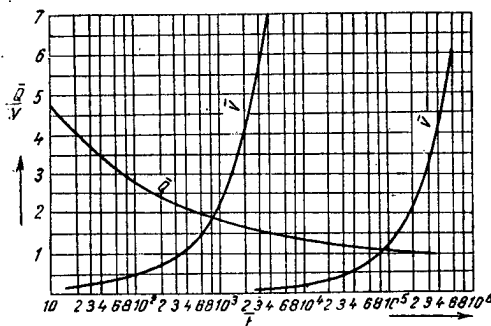


Fig. 115. Variația debitului \bar{Q} injectat în sonda de injecție și a volumului cumulativ \bar{V} de apă injectată în funcție de timpul adimensional \bar{t} în perioada tranzitorie (abscisa în scară logaritmică).

mului cumulativ și scăderea debitului instantaneu injectat. Aceste relații au avantajul că sînt universal valabile, putînd fi aplicate oricărei rețele de sonde de injecție. Se observă din fig. 115 că după o scurtă scădere inițială a debitului \bar{Q} , devin valabile următoarele relații:

$$\left. \begin{aligned} \bar{Q} &\approx 1/\ln \bar{t} \\ \bar{V} &\approx \bar{t}/\ln \bar{V} \end{aligned} \right\} \quad (357)$$

2) Interferența sondelor de injecție. Fenomenul de interferență are loc de la întîlnirea apei injectate în două sonde alăturate și coincide cu producția maximă de țiței. Interferența durează pînă cînd fenomenul de curgere devine staționar. După ce conta-

ctele apă-țiței din două sonde de injecție vecine s-au întîlnit, relațiile (353), (354), (355) și (356) nu mai sînt valabile. Pentru a se putea determina valorile \bar{V} , \bar{Q} și \bar{t} la începutul interferenței se calculează volumul cumulativ \bar{V}_i pentru fiecare sistem în parte.

α) Volumul cumulativ adimensional \bar{V}_i , în momentul interferenței pentru diverse sisteme de spălare cu apă.

α₁) Sistem în linie directă

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_i &= \frac{1}{4} \left(\frac{a}{r_s} \right)^2 \text{ pentru } a \leq 2d \\ \bar{V}_i &= \left(\frac{d}{r_s} \right)^2 \text{ pentru } a \geq 2d \end{aligned} \right\} \quad (358)$$

α₂) Sistem pătratic

$$\bar{V}_i = \frac{1}{2} \left(\frac{d}{r_s} \right)^2 \quad (359)$$

α₃) Sistem exagonal cu injecție centrală

$$\bar{V}_i = \frac{3}{4} \left(\frac{d}{r_s} \right)^2 \quad (360)$$

α₄) Sistem exagonal cu injecție periferică

$$\bar{V}_i = \frac{1}{4} \left(\frac{d}{r_s} \right)^2 \quad (361)$$

β) Debitul instantaneu \bar{Q}_i la începutul interferenței pentru diverse sisteme de spălare cu apă, se obține cu ajutorul ecuației (356) care devine

$$\bar{Q}_i = \frac{1}{\ln \bar{V}_i} \quad (362)$$

Ecuația (362) se aplică fiecărui sistem, pentru care a fost calculată valoarea lui \bar{V}_i .

γ) Timpul adimensional \bar{t}_i la care are loc interferența pentru diverse sisteme de spălare cu apă, se obține adaptînd ecuația (353) pentru \bar{Q}_i sau \bar{V}_i

$$\left. \begin{aligned} \bar{t}_i &= 1 + e^{1/\bar{Q}_i} \left(\frac{1}{\bar{Q}_i} - 1 \right) \\ \bar{t}_i &= 1 + \bar{V}_i (\ln \bar{V}_i - 1) \end{aligned} \right\} \quad (363)$$

Ecuația (363) obținută se aplică fiecărui sistem pentru care au fost calculate valorile respective \bar{Q}_i sau \bar{V}_i .

Perioada de interferență este foarte greu de studiat analitic, dar se admite că debitul \bar{Q}_i scade liniar în acest interval la o valoare \bar{Q}_s , care corespunde începutului perioadei staționare, iar volumul cumulativ \bar{V}_i crește pînă la o valoare \bar{V}_s corespunzătoare tot începutului perioadei staționare. Debitele staționare se

obțin în conformitate cu ecuațiile (326), (328), (329) și (330) și care exprimate adimensional, au următoarea formă:

8) Debitul momentan adimensional \bar{Q}_s în timpul perioadei staționare pentru diverse sisteme de spălare cu apă

8₁) Sistem în linie directă

$$\bar{Q}_s = \frac{1}{2\pi d/a + 4\ln \frac{a}{2\pi r_s}} \quad (364)$$

8₂) Sistem în linie alternată

$$\bar{Q}_s = \frac{1}{2\ln \frac{\text{ch}^4 \pi d/a \cdot \text{ch}^3 3\pi d/a}{\text{sh}^2 \pi r_s/a \cdot \text{sh}^4 2\pi d/a \cdot \text{sh} 4\pi d/a}} \quad (365)$$

8₃) Sistem pătratic

$$\bar{Q}_s = \frac{1}{4\ln d/r_s - 2,476} \quad (366)$$

8₄) Sistem exagonal

$$\bar{Q}_s = \frac{1}{3\ln d/r_s - 1,7073} \quad (367)$$

ε) Durata perioadei de interferență $\Delta \bar{t}$, se calculează prin raportul diferențelor de volum $\bar{V}_s - \bar{V}_i$, la debitul mediu de injecție, $\frac{1}{2} (\bar{Q}_i + \bar{Q}_s)$ în valori dimensionale;

$$\Delta \bar{t} = \frac{\bar{V}_s - \bar{V}_i}{(\bar{Q}_i + \bar{Q}_s)/2} \quad (368)$$

3) Perioada staționară de injecție. În cadrul acestei perioade, se obține în sonda de reacție un debit egal cu cel introdus în sondele de injecție. Dacă diferența de presiune între sonda de injecție și reacție, ca și toate constantele fizice ale stratului și fluidelor rămân constante, valoarea debitului \bar{Q}_s se păstrează neschimbată în perioada staționară.

În această perioadă se vor aplica deci toate detaliile de calcul și toate condițiile de curgere, stabilite la paragraful b al acestui capitol.

4) Modul de tratare a problemelor în cazul fenomenului tranzitoriu de curgere. Pentru rezolvarea problemei se procedează în felul următor:

— Se stabilesc mai întâi în valori adimensionale variația lui \bar{Q} și \bar{V} în raport cu timpul. În acest scop se calculează mai întâi \bar{Q}_i pentru sistemul de spălare respectiv și pe baza acestuia se calculează cu ecuațiile (362) și (363), valorile lui \bar{V}_i și \bar{t}_i . Dând lui \bar{t} valori cuprinse între zero și \bar{t}_i se obțin valorile corespunzătoare prin

ecuațiile (362) și (363) ale lui \bar{Q} și \bar{V} în perioada nestaționară. Pe baza variației lui \bar{V} și \bar{Q} față de \bar{t} obținute așa cum s-a indicat, se poate trasa o diagramă ca în fig. 116.

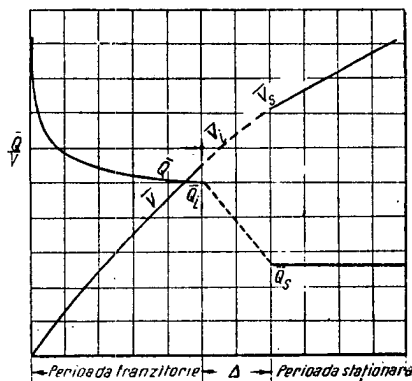


Fig. 116. Descrierea fenomenului hidrodinamic al spălării cu apă în valori adimensionale (\bar{Q} , \bar{V} , \bar{t}).

Pe baza ecuațiilor ((364) — (367)) se obține pentru sistemul de spălare respectiv valoarea lui \bar{Q}_s și se calculează în același timp valoarea lui \bar{V}_s ca un volum total de umplere al relației respective. În acest fel, se delimitează pe diagramă pozițiile-limită ale perioadei de interferență. Durata acestei perioade se determină cu ecuația (368) iar variația lui \bar{Q} și \bar{V} se trasează prin linii punctate ca în fig. 116.

— În perioada staționară, valoarea \bar{Q}_s calculată rămâne aceeași, iar volumul \bar{V}_s crește direct proporțional cu produsul dintre \bar{Q}_s și \bar{t} .

Se observă în fig. 116 variația lui \bar{Q} în perioada tranzitorie, când primele debite sînt foarte mari și scade apoi rapid la debite instantanee mult mai mici.

— Pe baza caracteristicilor fizice ale zăcămintului respectiv, valorile \bar{V} , \bar{Q} , și \bar{t} sînt transformate în valori dimensionale V , Q și t prin intermediul ecuațiilor (353), (354) și (355).

Fig. 116 are un caracter universal, întrucît ea reprezintă o variație a unor valori adimensionale, deci nu este limitată de condițiile fizice ale zăcămintului.

3. Spălarea cu gaze. a) Generalități. În cazul spălării cu gaze, problema este mult mai complicată din punct de vedere analitic, întrucît în locul unui front continuu de gaze (asemănător cu cel al apei), țigheul este antrenat de gazele injectate. Antrenarea țigheului de către gaze spre sonda de reacție duce la o micșorare a saturației în țighe a zăcămintului. Pe acest considerent saturația în țighe va fi mult mai mică în jurul găurii de sondă de injecție, însă va fi și mult mai mare la o depărtare de aceasta. Aceasta înseamnă că distribuția saturației în țighe este cu totul neuniformă.

De aceea, în locul descrierii mișcării fluidelor se va urmări variația saturației în țitei, legată de volumul de gaze injectate.

b) Condițiile de rezolvare a problemei. S-a plecat de la variația raportului $\frac{k_g}{k_t}$ în raport cu saturația în țitei reprezentată după figura 80 într-o scară semilogaritmică de unde analitic

$$\frac{k_g}{k_t} = e^{a-cS_t}$$

sau:

$$\ln \frac{k_t}{k_g} = a - cS_t. \quad (369)$$

Exprimînd raportul $\frac{k_g}{k_t}$ în funcție de debitele

de gaze și țitei, se pot scrie:

$$\frac{k_g}{k_t} = \frac{Q_g \mu_g}{Q_t \mu_t b_t \rho_g} \quad (370)$$

în care:

k_g și k_t — sînt respectiv permeabilitățile efective pentru gaze și țitei;

μ_g și μ_t — respectiv viscozitățile țiteiului și gazelor;

Q_g și Q_t — debitele-volumetrice (în elementul de volum analizat) de gaze, respectiv țitei;

b_t — coeficientul de volum al țiteiului;

ρ_g — masa specifică a gazelor.

Pe baza ecuației (370) se poate deduce legătura între gazele de injecție și saturația în țitei. Presupunînd curgerea ca fiind instantanee staționară, debitul de țitei trebuie să fie proporțional cu suma debitelor de gaze și țitei, și atunci, dacă se consideră că presiunea este constantă, variația saturației cu timpul devine:

$$\begin{aligned} c \frac{dS_t}{dt} &= - \frac{cb_t}{Ahm} Q_t = \\ &= \frac{1}{Q_t} \frac{dQ_t}{dt} - \frac{1}{Q_g} \frac{dQ_g}{dt} \end{aligned} \quad (371)$$

în care A este suprafața zăcămintului, h grosimea stratului, m porozitatea și c o constantă.

Prin integrarea ecuației (371) se obține

$$Q_t = \frac{Ahm}{cb} \cdot \frac{d \ln V}{dt} = \frac{Am h Q_g}{cbV} \quad (372)$$

în care V , volumul cumulativ de gaze este

reprezentat de cantitatea totală de gaze injectate plus gazele aflate inițial în strat, V_i .

$$V = \int_0^t Q_g dt + V_i \quad (373)$$

În ecuația (372) se vede că debitul de țitei scade în timp și este invers proporțional cu cantitatea de gaze injectate. Pe acest considerent volumul cumulativ de țitei extractibil \bar{Q} se obține din relația

$$\bar{Q} = \frac{Ahm}{b_t \cdot c} \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (374)$$

în care se vede că valoarea lui \bar{Q} crește logaritmnic cu raportul volumelor de gaze injectate. Dacă se consideră debitul de gaze Q_g ca fiind constant ($\bar{Q}_g = \text{constant}$), debitul de țitei se poate scrie

$$Q_t = \frac{Ahm}{cb_t(t + V_i/Q_g)} \quad (375)$$

din care se vede că debitul de țitei în cazul unei injecții constante de gaze este invers proporțional cu timpul. Deși această relație nu este general valabilă, s-a găsit totuși o relație aproximativă între timpul t și raportul $\frac{1}{Q_t}$. Valoarea lui c se obține din

curba permeabilitate-saturație și această valoare c a fost legată de experimente practice ale variației debitului Q cu timpul t . Valoarea lui c , pentru medii poroase formate din nisipuri consolidate a fost găsită între 15—30, iar uneori valoarea aceasta oscilează în jurul lui 50. În general se poate spune, că pe măsură ce constanta c este mai mare, crește mai repede raportul permeabilităților efective și se micșorează eficacitatea injecției de gaze.

Variația saturației în țitei este invers proporțională cu c , după cum rezultă din ecuația (371) și este direct proporțională cu logaritmul raportului debitelor $\frac{Q_g}{Q_t}$

$$\Delta S_t = \frac{1}{c} \ln \frac{Q_1}{Q_2} \quad (376)$$

iar de aici factorul de recuperare va fi

$$\bar{Q} = \frac{Am h \Delta S_t}{b_t} \quad (377)$$

Variația rației de gaze G se obține din raportul $\frac{Q_g}{Q_t}$ și are expresia

$$G = \frac{Q_g}{Q_t} = \frac{b\beta_t}{Ah_f} V \quad (378)$$

sau

$$G = \frac{G_i}{V_i} V \quad (379)$$

unde G_i este rația medie corespunzătoare lui V_i , se observă că rația G crește cu volumul de gaze injectate. Aceiași rație G se poate exprima și în funcție de volumul cumulativ extractibil de țitei \bar{Q} , sub forma

$$G = G_i e^{G_i \bar{Q} / V_i} \quad (380)$$

c) *Modul de lucru.* Analiza hidrodinamică a procesului de injecție cuprinde în general variația debitului de țitei extras Q_t în funcție de timp. Pentru aceasta se întrebuințează relația (375), în care se introduc toate valorile date de condițiile de exploatare și în care rămân două necunoscute: Q_t și t . Dînd valori lui t , se obține evoluția debitului Q_t în timp.

Pentru determinarea saturației în țitei se întrebuințează relația (376), care indică micșorarea saturației în țitei a zăcămintului corespunzătoare căderii de debit de la Q_1 la Q_2 .

Cantitatea de țitei extrasă \bar{Q} se obține prin relația (377)

$$\bar{Q} = \frac{Amh \Delta S_t}{b}$$

Trasînd o serie de diagrame cum ar fi:

\bar{Q} față de timp pentru raportul $\frac{V_2}{V_1}$,

ΔS_t în funcție de timp pentru raportul $\frac{Q_1}{Q_2}$

G în funcție de timp pentru \bar{Q} și V se obține o prevedere hidrodinamică a procesului de spălare cu gaze.

1. INTERFERENȚA SONDELOR (Interacțiunea sondelor)

a. Generalități

Interferența sondelor este influența pe care și-o exercită reciproc sondele în cadrul exploatarei simultane a unui aceluiași zăcămint. Se consideră sondă de influență sau de excitație, acea sondă asupra căreia se execută controlat o modificare de debit la un moment dat. Se consideră sondă de reacție sau influențată, acea sondă asupra căreia are urmări modificarea adusă în sonda de excitație.

Interacțiunea sondelor este foarte adesea folosită pentru a se putea urmări caracterele fizico-geologice ale unui zăcămint (de exemplu: identificarea faliilor, verificarea permeabilității stratului și a continuității ei și a compresibilității fluidelor etc.).

Considerînd într-un zăcămint două sonde 1 și 2, se observă că debitul sondei 1 este mai

mare cînd aceasta produce singură și este mai mic cînd produce simultan cu sonda 2. Notînd primul debit cu Q_1 și al doilea cu Q'_1 ,

$$Q_1 > Q'_1$$

de unde noțiunea indicelui de interferență J

$$J = \frac{Q_1}{Q'_1} > 1. \quad (381)$$

V. N. Scelcacev propune de asemenea un alt indice numit indice total de interferență U ,

$$U = \frac{Q_1 + Q'_1}{Q_1} \quad (382)$$

În problema interacțiunii sondelor se consideră că fenomenul de curgere este staționar, fluidele sînt incompresibile și omogene, iar sondele sînt considerate ca fiind sonde perfecte din punct de vedere hidrodinamic.

b. Teoria generală a interferenței (interacțiunii)

În tratarea problemelor de interferență în cazul unui fenomen staționar, efectele pot fi determinate cantitativ și nu calitativ. Faptul că curgerea este staționară permite urmărirea condițiilor geometrice în cadrul curgerii fluidelor și a interacțiunii sondelor.

1. *Interacțiunea unui grup de sonde.* Pentru cazul unui grup mic de sonde amplasate într-un zăcămint (fig. 117) al cărui contur circular de

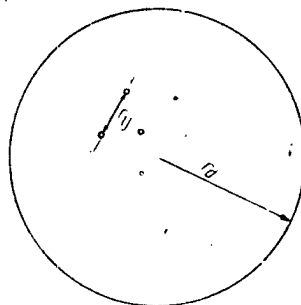


Fig. 117. Un grup mic de sonde amplasate într-o suprafață circulară ce reprezintă un mediu poros circular.

rază r_d este mult mai mare decît distanța r_{ij} între două sonde, i și j , s-a găsit că distribuția presiunii localizată în punctul j poate fi exprimat sub forma

$$P_j = P_d + \frac{\mu b}{2\pi kh} \left(Q_j \ln r_j + \sum' Q_i \ln r_{ij} \right)^*, \quad (383)$$

*) Prin notația \sum' , se înțelege convențional omiterea termenului $i = j$

în care p_d este presiunea la conturul de alimentare r_d ;

i și j sint 2 sonde din grupul de sonde amplasate în zăcămintul circular cu raza de contur r_d ;

Q_j este debitul sondei j .

Folosind această ecuație (383) debitul Q capătă pentru o singură sondă expresia

$$Q = \frac{2\pi k (P_d - P_s)}{\mu b \ln r_d / r_s} \quad (384)$$

a) Cazul interacțiunii a două sonde. Cazul interacțiunii a două sonde este arătat în fig. 118, în care aplicîndu-se ecuația (383) pentru

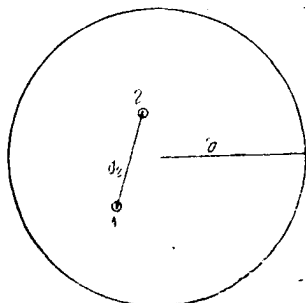


Fig. 118. Două sonde amplasate într-un mediu poros de formă circulară.

cazul a 2 sonde de raze r_s aflate la o distanță d_2 una de alta, se obține

$$Q_1 = Q_2 = \frac{2\pi kh (p_d - p_s)}{\mu b \ln r_d^2 / d_2 r_s} \quad (385)$$

în care p_s este valoarea presiunii la sondă, valabilă pentru sonda 1 și 2.

Efectul interacțiunii poate fi exprimat sub forma

$$\begin{aligned} \frac{Q_1 + Q_2}{2Q_0} &= \frac{\ln R / r_s}{\ln r_d^2 / r_s d_2} = \\ &= 1 - \frac{\ln R / d_2}{\ln r_d^2 / r_s d_2} \end{aligned} \quad (386)$$

în care Q_0 reprezintă debitul unei sonde ce ar fi produs singură din zăcămint. Pentru cazul lui $r_d = 1500$ m, $d_2 = 60$ m, și $r_s = 7,5$ cm, fiecare sondă își micșorează debitul cu 24,5%.

b) Cazul interacțiunii a trei sonde. În condiții similare de rezolvare ca în cazul interferenței a două sonde, se va obține debitul sondei 1, 2 sau 3, ca fiind egal cu

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \frac{2\pi kh (p_d - p_s)}{\mu b \ln r_d^3 / r_s d_3^2} \quad (387)$$

Cazul interacțiunii a trei sonde este ilustrat în fig. 119 în care sondele 1, 2 și 3 se află în vîrfurile unui triunghi echilateral, de latură d_3 .

c) Cazul interacțiunii a patru sonde. În acest caz, cele patru sonde, 1, 2, 3 și 4, se află plasate în cele patru colțuri ale unui pătrat

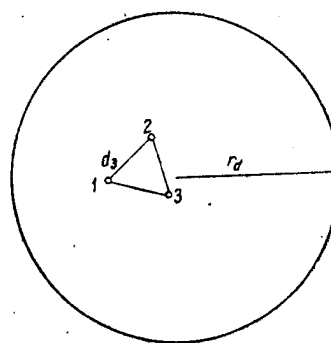


Fig. 119. Un grup de trei sonde amplasat într-un mediu poros de formă circulară.

cu latura d_4 ca în fig. 120. Simetria acestor 4 sonde duce la un debit egal pentru fiecare din ele, este:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \frac{2\pi kh (p_d - p_s)}{\mu b \ln r_d^4 / \sqrt{2} r_s d_4^3} \quad (388)$$

Pe baza acestei ecuații (388) se poate face analogia cu relația (92) obținută pentru cazul

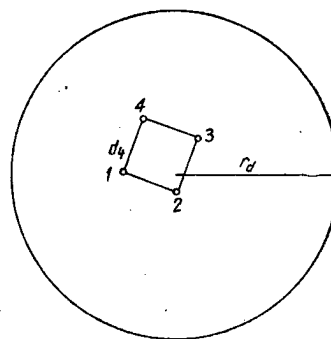


Fig. 120. Un grup de patru sonde amplasat într-un mediu poros de formă circulară.

unei singure sonde, alimentată de un contur circular cu rază egală cu

$$r_d^4 / \sqrt{2} d_4^3.$$

De asemenea debitul din ecuația (388) poate fi egal cu debitul unei singure sonde (ecuația 92), cu raza sondei avînd expresia

$$(\sqrt{2} r d_4^3)^{1/4}.$$

d) Cazul interacțiunii a cinci sonde. Considerînd sondele 1, 2, 3, 4 și 5 amplasate ca

în fig. 121, se vede că din condiții de simetrie, debitul sondelor 1, 2, 3, 4 și 5, este diferit de debitul sondei 5. Rezultă astfel:

$$Q_1 = \frac{2\pi k}{b\mu\Delta} (p_d - p_s) \ln \frac{d}{\sqrt{2} r_s}$$

și

$$Q_5 = \frac{2\pi k}{b\mu\Delta} (p_d - p_s) \ln \frac{d}{4\sqrt{2} r_s} \quad (389)$$

unde

$$\Delta = 4 \ln \frac{\sqrt{2} r_d}{d} \ln \frac{d}{\sqrt{2} r_s} + \ln \frac{r_d}{r_s} \ln \frac{d}{4\sqrt{2} r_s} \quad (390)$$

iar raportul acestora este

$$\frac{Q_5}{Q_1} = \frac{\ln(d/4\sqrt{2} r_s)}{\ln(d/\sqrt{2} r_s)} = 1 - \frac{\ln 4}{\ln(d/\sqrt{2} r_s)}$$

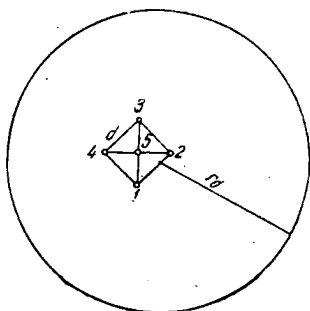


Fig. 121. Un grup de 5 sonde amplasat într-un mediu poros de formă circulară.

Prin intermediul ecuației (383), presiunile la sondă și la contur sunt următoarele:

$$p_s = c + \frac{\mu b}{2\pi k} \left(Q_1 \ln \sqrt{2} r_s d^3 + Q_5 \ln \frac{d}{\sqrt{2}} \right)$$

$$p_s = c + \frac{\mu b}{2\pi k} \left(4 Q_1 \ln \frac{d}{\sqrt{2}} + Q_5 \ln r_s \right) \quad (391)$$

Sonda 5, datorită poziției ei suferă o scădere mai mare de debit decât celelalte patru, pierdere ce este reprezentată prin termenul

$$\frac{\ln 4}{\ln(d/\sqrt{2} r_s)}$$

c) Cazul interacțiunii a nouă sonde. În baza condițiilor de simetrie ce apar în fig. 122, se poate spune că debitele sunt egale pentru următoarele sonde:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= Q_3 = Q_7 = Q_9 \\ Q_2 &= Q_4 = Q_6 = Q_8 \end{aligned} \right\} \quad (392)$$

Pe această bază, se poate determina raportul debitelor $Q_1/Q_2/Q_5$ ca fiind egale cu

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{y^2 + y \ln \frac{5}{2^{3/2}} - (\ln 2)^2}{y^2 + y \ln \frac{5}{2^{7/2}} + \ln \sqrt{2} \cdot \ln \frac{5}{4}} \quad (393)$$

$$\frac{Q_2}{Q_5} = \frac{y^2 - y \ln 2^{7/2} + \ln 2 \cdot \ln 200 - (\ln 5)^2}{y^2 - y \ln 2^{7/2} + \ln 2 \cdot \ln 200 - (\ln 5)^2}$$

în care

$$y = \ln \frac{d}{r_s}$$

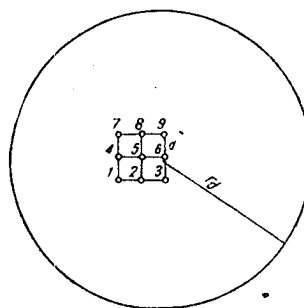


Fig. 122. Un grup de 9 sonde amplasat într-un mediu poros de formă circulară.

Dacă d este 60 m, și $r_s = 7,5$ cm, se obține:

$$Q_1/Q_2/Q_5 = 1,00/0,819/0,615 \quad (394)$$

dacă d este însă 15 m, pentru aceeași rază r_s , efectul interferenței este

$$Q_1/Q_2/Q_5 = 1,00/0,778/0,533$$

Presiunea la sondă pe baza ecuației (383) rezultă ca fiind egală pentru fiecare din cele 3 sonde, din categoria 1, 2 și 5

$$\left. \begin{aligned} p_s &= c + \frac{\mu b}{2\pi k} [Q_1 \ln 8\sqrt{2} r_s d^3 + \\ &\quad + Q_2 \ln 5d^4 + Q_5 \ln d \sqrt{2}] \\ p_s &= c + \frac{\mu b}{2\pi k} [Q_1 \ln 5d^4 + \\ &\quad + Q_2 \ln 4r_s d^3 + Q_5 \ln d] \\ p_s &= c + \frac{\mu b}{2\pi k} [Q_1 \ln 4d^4 + \\ &\quad + Q_2 \ln d^4 + Q_5 \ln r_s] \end{aligned} \right\} \quad (395)$$

f) Cazul interacțiunii a 16 sonde. Pentru acest caz ilustrat în fig. 123, din condiții de simetrie, apar următoarele sonde cu același debit

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= Q_4 = Q_{13} = Q_{16} \\ Q_2 &= Q_3 = Q_5 = Q_6 = Q_9 = Q_{12} = Q_{14} = Q_{15} \\ Q_6 &= Q_7 = Q_{10} = Q_{11} \end{aligned} \right\} \quad (396)$$

Pentru aprecierea raportului debitelor se poate scrie debitele celor trei sonde Q_1 , Q_2 și Q_6

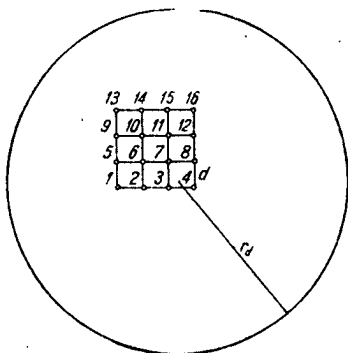


Fig. 123. Un grup de 16 sonde amplasat într-un mediu poros de formă circulară.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{y^2 + y \ln \frac{26 \sqrt{20}}{3} + \ln 13 \ln \sqrt{20} - \ln \frac{3 \sqrt{10}}{2} \cdot \ln 10 \sqrt{2}}{y^2 + y \ln \frac{20 \sqrt{13}}{27} + \ln \sqrt{20} \cdot \ln \frac{20}{27 \sqrt{2}} - \ln \frac{\sqrt{2}}{20} \cdot \ln \frac{\sqrt{130}}{10}}$$

$$\frac{Q_6}{Q_2} = \frac{y^2 + y \ln \frac{2 \sqrt{20}}{81} - \ln 13 \ln \frac{\sqrt{130}}{10} - \ln \frac{20}{27 \sqrt{2}} \ln \frac{3 \sqrt{10}}{2}}{y^2 + y \ln \frac{2 \sqrt{20}}{81} - \ln 13 \ln \frac{\sqrt{130}}{10} - \ln \frac{20}{27 \sqrt{2}} \ln \frac{3 \sqrt{10}}{2}} \quad (397)$$

Pe baza ecuației (383) presiunea la sondă pentru sondele de tipul 1, 2 și 6 este

$$\left. \begin{aligned} p_s &= c + \frac{\mu b}{2\pi k} [Q_1 \ln 27 \sqrt{2} r_s d^3 + \\ &+ Q_2 \ln 520 d^3 + Q_6 \ln 20 d^4] \\ p_s &= c + \frac{\mu b}{2\pi k} [Q_1 \ln 2 \sqrt{130} d^4 + \\ &+ Q_2 \ln 60 \sqrt{10} r_s d^7 + Q_6 \ln 2 \sqrt{10} d^4] \\ p_s &= c + \frac{\mu b}{2\pi k} [Q_1 \ln 20 d^4 + \\ &+ Q_2 \ln 40 d^8 + Q_6 \ln \sqrt{2} r_s d^3] \end{aligned} \right\} \quad (398)$$

Raportul debitelor pentru $d/r_s = 800$ este

$$Q_1/Q_2/Q_6 = 1,00/0,735/0,445$$

iar pentru $d/r_s = 200$ este

$$Q_1/Q_2/Q_6 = 1,00/0,692/0,362.$$

g) Cașul unei baterii inelare. Considerînd un grup de sonde așezate pe un cerc de rază r_b neconcentric cu gaura de sondă se obține următorul debit pentru fiecare sondă j din baterie:

$$Q_j = \frac{2\pi k h \Delta p / \mu b}{\left[\ln \frac{r_d^n}{r_b^{n-1} r_s} - \sum_{i=1}^{n-1} \ln 2 \sin \frac{\pi i}{n} \right]} \quad (399)$$

pentru n sonde debitul total ce se obține se exprimă prin ecuația

$$Q_n = n Q_j = \quad (400)$$

$$= \frac{2\pi k h \Delta p / \mu b}{\left(\ln \frac{r_d}{r_b} + \frac{1}{n} \ln \frac{r_b}{r_s} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \ln 2 \sin \frac{\pi i}{n} \right)}$$

Dacă bateria de sonde este concentrică cu conturul de alimentare fig. 124 atunci debitul fiecărei sonde este

$$Q_j = \frac{2\pi k h (p_d - p_s)}{r_i \ln \frac{r_c^{2n} - r_b^{2n}}{n \cdot r_c^n \cdot r_b^{n-1} \cdot r_s}} \quad (399')$$

Reprezentînd grafic în fig. 125 variația raportului Q_n/Q_j , adică raportul dintre producția unei baterii ecuația (400) și a unei singure sonde ecuația (399), față de numărul n al sondelor dintr-o baterie, se observă:

— pentru raportul $r_b/r_s = 200$, debitul obținut este mai mare decît în cazul cînd același raport are valoarea 800;
— creșterile de debit sînt sensibile la mărirea numărului de sonde de la 1—5, după aceea creșterile debitului sînt practic insensibile;

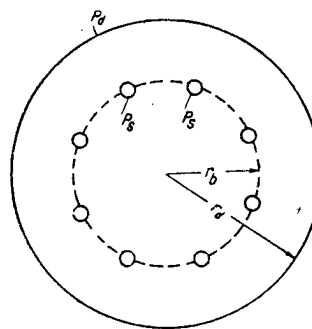


Fig. 124. Un grup de sonde așezat într-o baterie circulară într-un mediu poros de formă circulară.

— curbele trasate s-au calculat pentru $r_d = 1500$ m și $r_s = 7,5$ cm.

2. Interacțiunea sondelor dintr-un șir infinit de sonde. Considerînd ca fiind distribuite în șiruri și alimentate de un contur liniar de alimentare, paralel cu șirurile de sonde, se poate face calculul efectului interacțiunii plecînd de la următoarele ipoteze:

— că sondele sînt uniform distribuite în cadrul unui șir,

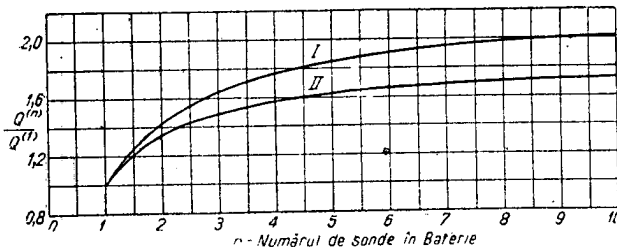


Fig. 125. Variația capacității de producție a unei baterii circulare de sonde, în funcție de numărul de sonde din baterie. Curba I = $r_b/r_s = 200$; curba II = $r_b/r_s = 800$; raza sondei $r_s = 7,5$ cm și raza conturului de alimentare $r_d = 1500$ m.

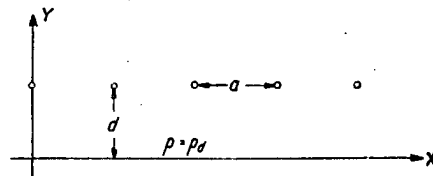


Fig. 126. Șir infinit de sonde paralel cu conturul liniar de alimentare.

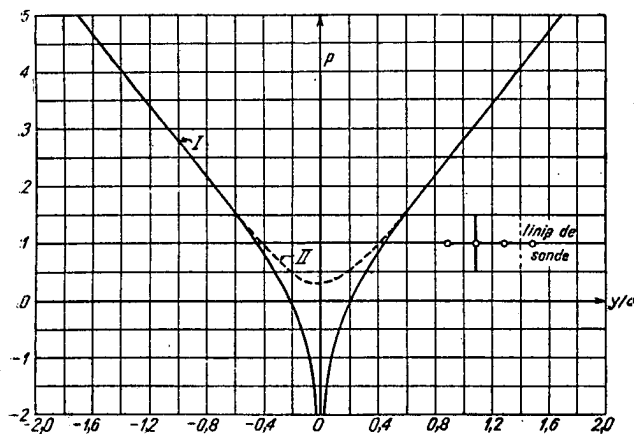


Fig. 127. Distribuția presiunii într-un profil perpendicular pe un șir infinit de sonde. Distribuția presiunii în profilul trecind printre sonde (linie continuă). Distribuția presiunii în profilul perpendicular pe șirul infinit de sonde și trecind printre 2 sonde (linie punctată). Șirul de sonde este considerat că se confundă cu axa x.

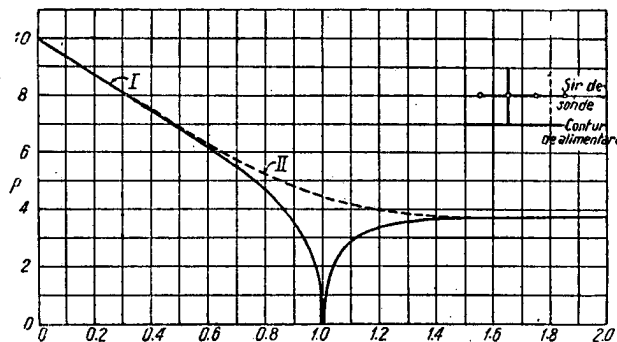


Fig. 128. Distribuția presiunii unui profil perpendicular pe un șir infinit de sonde. Distribuția presiunii în profilul trecind printre sonde (linie continuă). Distribuția presiunii în profilul perpendicular pe șirul infinit de sonde și trecind printre 2 sonde (linie punctată). Șirul de sonde considerat că se confundă cu axa x. Zăcămint cu alimentare unilaterală.

- că procesul de curgere este staționar, și
- fluidul omogen

Problema poate fi examinată pentru cazul exploatarei unui șir de sonde sau a exploatarei simultane a 2 sau 3 șiruri de sonde.

a) Cazul unui șir infinit de sonde. Considerând că de-a lungul axei X se află linia de apă, fig. 126, și că sondele sînt amplasate la o distanță d de axa X , într-un șir paralel cu această axă, se va obține prin metoda imaginilor debitul de forma

$$Q = \frac{2\pi k h \Delta P}{\mu b \ln (\operatorname{sh} 2\pi d/a) / (\operatorname{sh} \pi r_s/a)} \quad (401)$$

în care a este distanța dintre 2 sonde și r raza sondei.

Pentru o singură sondă ce ar exploata zăcămintul, în conformitate cu ecuația obținută în cazul conturului liniar infinit de alimentare, debitul ar fi

$$Q_0 = \frac{2\pi k h \Delta P}{\mu b \ln 2d/r_s} \quad (402)$$

Pe acest considerent, pentru raportul $d/a = 1$ și $d/r = 400$, raportul $Q/Q_0 = 0,64$.

Distribuția presiunii în acest caz este

$$p = P_d + \frac{\mu Q b}{4\pi k h} \ln \frac{\operatorname{ch} 2\pi (y-d)/a - \cos 2\pi x/a}{\operatorname{ch} 2\pi (y+d)/a - \cos 2\pi x/a} \quad (403)$$

în care p_d este presiunea la conturul de alimentare.

Pe baza ecuației (403) s-a trasat variația presiunii în funcție de raportul Y/a ca în figurile 127 și 128.

b) Cazul a 2 șiruri infinite de sonde. În acest caz distanța de la conturul de alimentare la primul șir este d_1 iar pînă la al doilea șir este d_2 ca în fig. 129.

Considerind că distanța între 2 sonde aflate în șirul 1 sau 2, este exprimată prin a și că debitul unei sonde din șirul 1 este Q_1 și debitul unei sonde din șirul 2 este Q_2 se obține raportul debitelor

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\ln \frac{\operatorname{sh} \pi r_s/a \cdot \operatorname{sh} \pi (d_2 + d_1)/a}{\operatorname{sh} 2\pi d_2/a \cdot \operatorname{sh} \pi (d_2 - d_1)/a}}{\frac{\operatorname{sh} \pi r_s/a \cdot \operatorname{sh} \pi (d_2 + d_1)/a}{\operatorname{sh} 2\pi d_1/a \cdot \operatorname{sh} \pi (d_2 - d_1)/a}} \quad (404)$$

Distribuția presiunii este dată de ecuația următoare

$$p = P_d + \frac{\mu b}{4\pi k h} \left[Q_1 \ln \frac{\operatorname{ch} 2\pi (y-d_1)/a - \cos 2\pi x/a}{\operatorname{ch} 2\pi (y+d_1)/a - \cos 2\pi x/a} + Q_2 \ln \frac{\operatorname{ch} 2\pi (y-d_2)/a - \cos 2\pi x/a}{\operatorname{ch} 2\pi (y+d_2)/a - \cos 2\pi x/a} \right] \quad (405)$$

În cazul cînd presiunea la sonde este egală cu jumătate din presiunea conturului de alimentare și cînd $d_1 = a = d_2/2$ s'a trasat în fig. 130 variația presiunii la distanța Y de la conturul de alimentare.

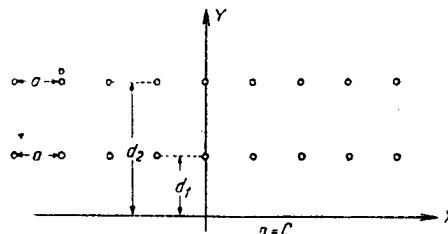


Fig. 129. Două șiruri infinite de sonde alimentate de un contur liniar de alimentare paralel cu șirurile de sonde

De asemenea, pe baza raportului debitelor Q_1/Q_2 s-a introdus noțiunea de «efect de ecranare» E_c , care este egal cu

$$E_c = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} = \frac{Q_1/Q_2}{1 + Q_1/Q_2} \quad (406)$$

Efectul de ecranare reprezentat în funcție de poziția șirurilor, este reprezentat în fig. 131, din care se pot extrage următoarele:

- curba 1 pentru cazul $d_2 - d_1 = a$, indică pentru $a = 200$ m o scădere foarte bruscă la creșterea valorii d_1 , dar tinde asimptotic la o valoare $E_c = 0,671$ pentru valori mai mari decît 60 m ale lui d_1 ;

- curba 2 ilustrează cazul cînd $d_1 = a = d_2/2$ și în care se vede că efectul de ecranare E_c variază cu d_1 , tinzînd încet spre o valoare $E_c = 0,5$, în care caz $Q_1/Q_2 = 1$;

- curba 3 a fost obținută în cazul cînd $d_1 = a$ și din care rezultă că efectul de ecranare E_c crește foarte repede cu distanța între șiruri ($d_2 - d_1$).

c) Cazul a 3 șiruri infinite de sonde. Considerînd sondele amplasate în 3 șiruri paralele cu axa X , ca în fig. 132 la distanțele respective d_1 , d_2 și d_3 , s-a obținut următoarele efecte de ecranare după cum rezultă din fig. 133, în care

$$S_1 = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \quad (407)$$

și

$$S_2 = \frac{Q_2}{Q_2 + Q_3} \quad (408)$$

Se observă din fig. 133 că E_c este foarte puțin afectat de creșterea lui $d_3 - d_2/a$, în timp ce s_2 crește sensibil cu acest raport. Se menționează că în cazul de față ca și în celelalte precedente, presiunea la gaura de sondă este considerată aceeași pentru toate sondele indiferent din ce șir.

Fig. 130. Distribuția presiunii în 2 profile perpendiculare pe șirurile infinite de sonde. Distanța între cele două șiruri și între primul șir și conturul de alimentare este egal cu distanța între sondele fiecărui șir. ($d_1 = d_2 = a$). Presiunea la conturul de alimentare este considerată 1 și presiunile la sondele fiecărui șir este considerată $\frac{1}{2}$. Distribuția presiunii în profilul trecând prin sondă (linie continuă). Distribuția presiunii în profilul trecând printre 2 sonde (linie punctată). Zăcămint cu alimentare unilaterală.

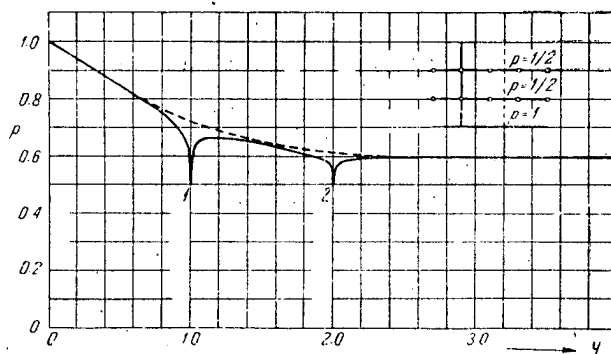


Fig. 131. Efectul de ecranare (E_c) pentru 2 șiruri infinite de sonde alimentate de un contur linear, de alimentare.

Curba I — $a = d_2 - d_1 = 200$ m; abscisa = d_1 .
Curba II — $d_2/2 = d_1 = a$; abscisa = d_1 .
Curba III — $a = d_1 = 200$ m; abscisa = $d_2 - d_1$.

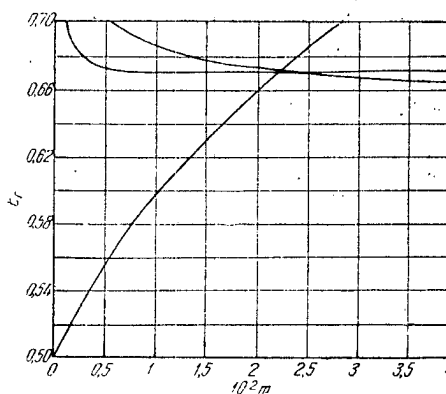


Fig. 132. Trei șiruri infinite de sonde alimentate de un contur linear de alimentare paralel cu șirurile.

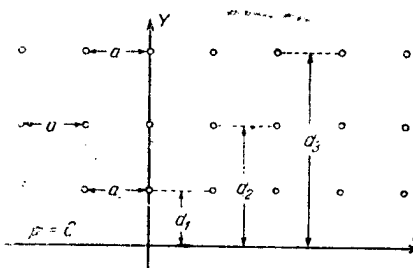
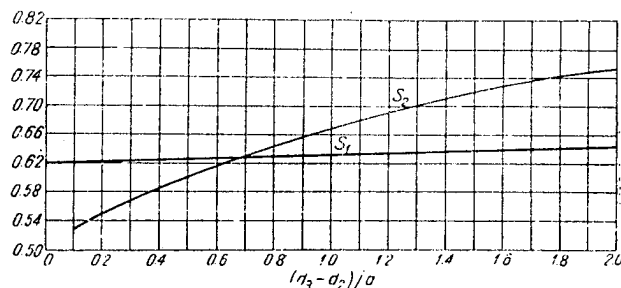


Fig. 133. Variația efectului de ecranare în cazul a 3 șiruri infinite de sonde față de raportul $d_3 - d_2 - a = 200$ m (E_1 — procentul cantității de țiței produsă prin șirul 1 și raportată la producția celor 3 șiruri) și (E_2 — procentul cantității de țiței ce a trecut prin șirul 1 și intră în șirul 2 și raportată la debitul șirului 2 și 3).



BIBLIOGRAFIE

HIDRAULICA GENERALĂ

- AGROȘCHIN I. I., DIMITRIEV G. P., PICALOV F. I.: HIDRAULICA — Gosenergoizdat, Moscova 1950.
 CARAFOLI E. și OROVEANU T.: Mecanica fluidelor — Ed. Academiei R.P.R., București, 1952.
 COCIN N. E., CHIBEL I. A., ROZE N. V.: Hidromecanica Teoretică — Ed. Tehnică, București, 1951.
 CRISTEA N.: Introducere în mecanica fluidelor — Institutul de Petrol și Gaze, București, 1953.
 JUCOVSKI N. E.: Lecții de hidrodinamică — Gostehizdat, Moscova 1949.
 PRANDTL L.: Hidro și aeromecanica — Ed. Julius Springer, Berlin 1929.
 VILLAT H.: Mecanica fluidelor — Gauthier-Villars et Cie, Paris 1938.

HIDRAULICA SUBTERANĂ

- AGADJANOV A. M.: Hidrogeologia și hidraulica apelor subterane — Gostoptehizdat 1950
 CERNOV N. S.: Cercetarea sondelor și stratelor de petrol și gaze — Gostoptehizdat 1953.
 CIARNĂI I. A.: Hidrodinamica subterană — Gostoptehizdat, Moscova 1948.
 CRISTEA N.: Hidraulica subterană, Institutul de Petrol și gaze, București, 1955
 CRÎLOV A. P. și alții: Bazele științifice ale exploatării zăcămintelor petrolifere. Ed. Tehnică, București 1951.
 CRÎLOV A. P. și MURAVIEV I. M.: Exploatarea zăcămintelor de țiței, Ed. Tehnică, București, 1950.
 GAZIEV, G. M.: Manual didactic de exploatarea zăcămintelor de petrol, Bacău-Moscova 1933.
 GOLDFRACHT TH: Probleme de hidraulică subterană, Ed. Tehnică, București, 1955.
 LAPUC B. B.: Bazele teoretice ale exploatării zăcămintelor de gaze naturale, Moscova 1948
 KAMENSKI G. N.: Bazele hidraulice apelor subterane, Gostoptehizdat — Moscova 1943.
 MUSKAT M.: Principii fizice ale exploatării de țiței — Mc Graw-Hill Book Comp. Inc. New-York 1949.
 MUSKAT M.: Curgerea fluidelor omogene prin medii poroase — I. W. E. Inc. Ann Arbor Michigan 1946
 SCELCACEV V.N.: Regim elastic al stratelor cu sisteme acvifere active — Gostoptehizdat 1948.
 SCELCACEV V. N.: Hidraulica subterană — Ed. Tehnică, București, 1953.
 Analele Academiei de Științe a U.R.S.S., Seria 1950, 1951, 1952 și 1953
 Arhiva de Studii și Rapoarte a Soc. « Sovrompetrol », Laboratorul Central de Cercetări Științifice, Cimpina.
 Tabele de funcțiuni — Jahnke Emde.

CAPITOLUL III

FIZICA ZĂCĂMINTELOR DE ȚITEI ȘI GAZE

A. PROPRIETĂȚILE ROCILOR COLECTOARE ȘI ALE ROCILOR INVECINATE

Definiția și elementele zăcămintului

Zăcămintul de hidrocarburi este o porțiune din scoarța terestră constituită din acumulări de hidrocarburi, care pot fi exploatate în condiții industriale și economice. Zăcămintul de hidrocarburi cuprinde:

a) roci-magazin (roci colectoare), ale căror spații goale conțin hidrocarburile;

b) roci de etanșare, care constituie limitele spațiale ale zăcămintului.

1. Rocile-magazin sînt, practic, toate sedimentare: nisipuri, gresii, aleurite, calcare, grupînd, în general, toate rocile sedimentare cu porozitate peste 10—15 %, cu granulometrie nu prea fină și, în consecință, cu permeabilitate suficientă.

2. Rocile de etanșare, care constituie acoperișul, talpa și flancurile zăcămintului sînt în general, roci sedimentare compacte, cu porozitate redusă, sau, în caz contrar, cu o compoziție granulometrică atît de fină și de neomogenă (III. B. b. 2. b. 2), încît permeabilitatea lor față de Țitei este, practic, nulă.

În majoritatea lor, rocile de etanșare pot fi argile sau marne argiloase, calcare, dolomite, cum și, uneori, roci eruptive sau metamorfice. Funcțiunea de rocă de etanșare mai poate fi îndeplinită de apă, care poate acționa în acest sens, fie prin presiunea hidrostatică proprie, fie prin modificarea proprietăților de scurgere pe care ea o determină, chiar dacă este prezentă în cantități foarte reduse, la rocile sedimentare de natură argilooasă sau cu conținut parțial de elemente argiloase.

B. CARACTERISTICILE ROCILOR- MAGAZIN ȘI ALE ROCILOR INVECINATE

a. Definiții.

1. Rocile-magazin (roci colectoare). a) Nisipurile, care conțin elemente silicioase sau, mai rar și parțial, calcaroase, constituie roca-magazin sau roca-colectoare de elecțiune.

b) Pietrișurile, care conțin elemente eterogene, constituie numai în mod excepțional roca colectoare; chiar în acest caz, ele sînt mai mult roci de trecere către nisipurile cu bobul mare.

c) Gresiile, care conțin elemente silicioase și, uneori, calcaroase, mai rar feldspatice sau micacee sau în mai mică măsură, elemente din minerale mai rare, constituie, de asemenea, roci colectoare. Din cauza dificultății de a stabili o limită precisă între nisipuri și gresii, gradul de cimentare putînd varia între 0 și 100% din spațiile libere dintre elementele lor, gresiile sînt clasificate de terminologia curentă în extracția Țiteiului, tot ca « nisipuri », păstrîndu-se în general, numele de gresii numai pentru cele care, prin rezistența lor mecanică, creează dificultăți în procesul de foraj.

d) Calcarele și dolomitele constituie roci-colectoare numai datorită golurilor accidentale pe care le prezintă: goluri de origine mecanică, fisuri, crăpături, goluri de dizolvare avînd forme neregulate, adeseori tot forma fisurilor (bidimensionale), concentrate sau distribuite în spațiu pînă la o adevărată « porozitate », și goluri de sedimentare distribuite cu regularitate statistică în masa rocii (oolite, mai rar pisolite).

e) Aleuritele și nisipurile marhoase sau argiloase, deși pot constitui acumulări de Țitei, nu reprezintă roci-magazin în concepția economică a acestei numiri, decît foarte rar și în mică măsură (Moreni-Bana, Păcureți în Pontic și, în general « nisipurile » din Meoticul intermediar din bazinele Dimbovița-Prahova-Buzău.

Împreună cu argilele, ele pot prezenta accidental porozități destul de mari, 10—20%, și în cazul cînd nu au suferit procesele de tasare și de cimentare datorite factorilor de adîncime, chiar 33—40 %. Ele constituie mai mult trecerea către rocile de etanșare.

2. Rocile de etanșare. Argilele, marnele argiloase sau calcaroase, gresiile argiloase, calcarele și dolomitele compacte și nefisurate și, în general toate rocile sedimentare cu porozitate redusă sau, cel puțin, cu permeabilitate redusă, uneori sarea și gipsul, rocile eruptive și meta-

morfe, îndeplinesc funcțiunea de etanșare a fluidelor sub presiune din zăcămint, în condiții aproape totale, la scara de timp uzuală, dar mai mult sau mai puțin imperfect, la scara de timp geologică, după permeabilitatea efectivă (Cap. V. F. a.) pe care o prezintă la lichidele, respectiv la gazele din zăcămint, după presiunea de dezlocuire (Cap. V. F. b.) pe care o opun aceluiași fluid și după grosimea lor.

b. Proprietățile fizico-mecanice ale rocilor-magazin și ale rocilor de etanșare (învecinate)

1. **Densitatea rocilor-magazin și a celor învecinate**, îndeosebi a celor superioare, prezintă o importanță deosebită la determinarea presiunii litostatice asupra zăcămintului și, în multe cazuri, asupra presiunii însăși sub care se găsesc fluidele din zăcămintul în echilibru, încă nepus în exploatare. Densitatea medie a materialului solid al rocilor din paturile superficiale ale scoarței este de 2,5—2,6 însă, din cauza porozității lor medii, presiunile litostatice efectiv determinate cu ocazia operațiilor de cimentare sub presiune și de fracturare-fisurare hidrolică a straturilor (v. cap. XV) au indicat, pentru adâncimile de 0—1000 m, o valoare medie a densității de 1,8...2,0 iar pentru adâncimile de 1000—2000 m, valori medii (între suprafață și adâncimea respectivă) de 2,0—2,2. Pentru adâncimi mai mari, datele experimentale, mai puține, provenite în general de la cimentări sub presiune, indică o valoare de ordinul 2,4 cu tendința probabilă de a atinge către adâncimile mai mari densitatea rocilor compacte, adică valori de ordinul 2,65—2,70.

2. **Compoziția granulometrică**, numită, mai puțin exact, și compoziția mecanică a rocilor,

cuprinde elementele analitice care determină dimensiunile diferitelor elemente minerale ale rocii, mai mult sau mai puțin independente unele de altele din punctul de vedere al legăturii mecanice. Noțiunea de compoziție granulometrică nu are sens fizic pentru rocile compacte sau pentru cele compacte-fisurate. Pentru acestea, este mult mai reprezentativă compoziția dimensională a spațiului de pori, măsurabilă cu ajutorul relației saturație-depresiune capilară (v. Cap. V.) și exprimabilă sub aceeași formă cu compoziția granulometrică, fracțiile ponderale Δg fiind înlocuite prin fracțiile-volum din spațiul de pori.

Compoziția granulometrică este reprezentată fie analitic (tabele), fie grafic (diagrame), prin fracțiunea ponderală subunitară sau procentuală, însumată de toate elementele rocii ale căror dimensiuni sînt cuprinse între două limite, constituind o clasă granulometrică.

Prin dimensiune se înțelege diametrul mediu al bobului, în cazul elementelor care au toate dimensiunile de același ordin de mărime și dimensiunea minimă, în cazul elementelor care au una dintre dimensiuni simțitor diferită de celelalte două (fulgi, fibre). Rocile-magazin ale zăcămintelor de hidrocarburi conțin, în general, elemente din prima categorie, mai rar și parțial, elemente plate (fulgi de mică) și foarte rar elemente fibroase.

a) **Metode de analiză.** Determinarea fracțiunii ponderale a fiecărei clase granulometrice se poate efectua prin analiza de cernere sau prin metode sedimentometrice.

Analizele de cernere se efectuează cu o serie de site așezate în stivă verticală, cu dimensiunile ochiului în scădere de la sita superioară către cea inferioară, « prin refuz », cîntărindu-se cantitatea de material granular reținut de sita respectivă. Acesta alcătuiește o clasă granulo-

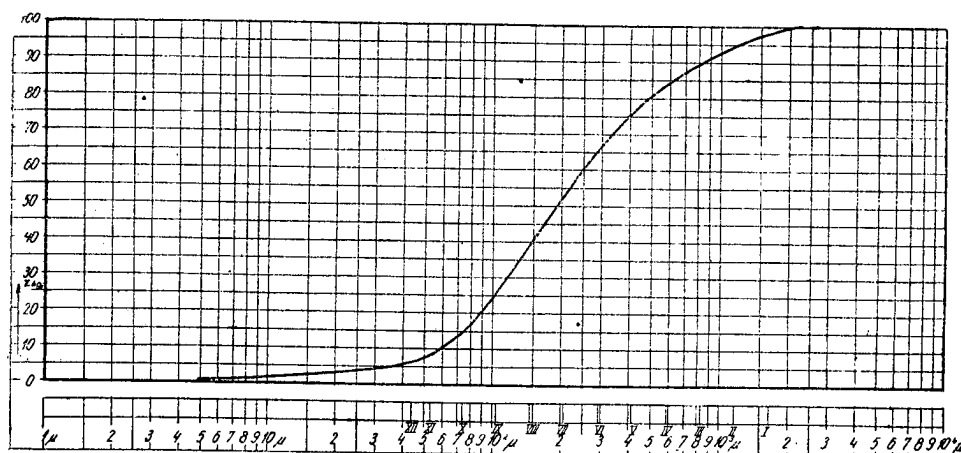


Fig. 1. Reprezentarea grafică a unei analize granulometrice de nisip colector; în abscisă: dimensiunile ochiului de sită respectiv nr. de ordine al sitrei; în ordonată: suma fracțiunilor ponderale de dimensiuni crescătoare.

Tabela 1. Analiza granulometrică a unui nisip de Dacian

Clasa granulometrică	Fracțiunea ponderală (Δg_i)
0,000 ... 0,044 mm	0,065
0,044 ... 0,053 mm	0,020
0,053 ... 0,074 mm	0,060
0,074 ... 0,104 mm	0,115
0,104 ... 0,147 mm	0,145
0,147 ... 0,208 mm	0,130
0,208 ... 0,295 mm	0,125
0,295 ... 0,417 mm	0,100
0,417 ... 0,589 mm	0,060
0,589 ... 0,833 mm	0,080
0,833 ... 1,169 mm	0,045
1,169 ... 1,651 mm	0,035
1,651 ... (2,400) mm	0,020
	1,000

metrică cu dimensiuni cuprinse teoretic între aceea a ochiului sitei respective și aceea a ochiului sitei imediat superioare.

Agitația sitei se realizează mecanic, cu mașini de cernere (cu camă excentrică, fig. 2) pentru

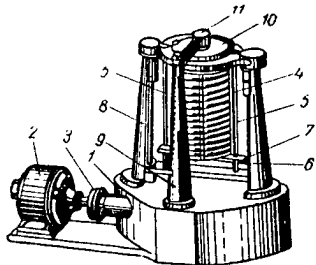


Fig. 2. Aparat de cernere automată: 1 — corpul aparatului; 2 — electromotor; 3 — cuplaj elastic; 4 — stivă de site; 5 — cadru rigid pentru site; 6 — cadru fix de susținere; 7 — punte solidă cu 5—5; 8 — ax de transmisie; 9 — pinion de comanda axului 8, de la 3; 10 — excentricul siteilor; 11 — pinion de comanda excentricului 10.

a asigura uniformitatea cernerii și reproducibilitatea analizei). Prepararea probei pentru cernere necesită o tehnică specială: fie dezagregare cu mojar de lemn, cu eforturi moderate pentru rocile cu bob mai rezistent fie dezagregare prin umezire și prin congelare repetată sau prin saturare cu un reactiv (de exemplu, acetat de sodiu, sulfat de sodiu, tiosulfat Na sau alte substanțe solubile prin simplă încălzire, în apa proprie de cristalizare) topit, urmată de cristalizare, pentru rocile cu elemente friabile.

Dezagregarea neadecvată a probelor este cauza principală a înexactității și a nereproducibilității analizelor granulometrice.

Sitele STAS 730-49 constituie o serie de site cu diametre de ochi mult mai apropiate decât treapta $\sqrt{2}$, folosită la analizele granulometrice ale rocilor colectoare.

Tabela 2. Site folosite curent în U.R.S.S. pentru analiza granulometrică a rocilor-colectoare

Sita	Nr. de ochiuri/țol	Latura orificiului de trecere al sitei
I	10	1,651 mm
II	14	1,168 mm
III	20	0,833 mm
IV	28	0,589 mm
V	35	0,417 mm
VI	48	0,295 mm
VII	65	0,208 mm
VIII	100	0,147 mm
IX	150	0,104 mm
X	200	0,074 mm
XI	270	0,053 mm

Dimensiunile normale de site folosite în U.R.S.S. sint cele date în tabela 2. Ele scad după

o scară al cărei raport este de aproximativ $\frac{1}{\sqrt{2}}$.

Deoarece aceste dimensiuni de site satisfac nevoile curente de exploatare, dar nu pe cele speciale, se mai folosește sita XII cu 325 ochiuri pe țol și cu latura orificiului de 0,044 mm. Rareori, se folosesc site cu 400 ochiuri/țol cu latura orificiului de circa 0,035 mm. Dimensiunea orificiului unei site cu o rețea pătrată oarecare poate fi estimată ținând seama că, din fracțiunea de țol ocupată de elementul sitei, trebuie scăzut diametrul firului care, la sitele cu dimensiuni mari, este de circa 33 % din element, iar la sitele fine atinge 45%, cu tendința de a crește repede la dimensiuni mai mici, din motive de rezistență.

Cu toate acestea, sitele fine rămân instrumente delicate și fragile, iar viteza lor de lucru scade odată cu finețea lor. Din această cauză, pentru analiza fracțiunilor fine se tinde să se folosească metode bazate pe viteza de cădere în lichid a elementelor (viteza simptotică), diferită după dimensiunile lor.

Pentru viteza de cădere în apă a cuarțului, media rezultatelor experimentale după Vasiliev, Gonciarov, Richards și Abdurașitov etc. este indicată în tabela 3.

Tabela 3. Viteza de cădere în apă la 15° a grăunților de cuarț, în cm/s

Diametrul grăunțelii de cuarț	0,30 mm	0,25 mm	0,20 mm	0,1 mm	0,01 mm
Viteza	3,12 cm/s	2,53 cm/s	1,95 cm/s	0,65 cm/s	0,007 cm/s

În cazul lichidelor cu densitate și cu viscozitate diferite de acelea ale apei, pentru grăunți suficient de mici (practic, cu raza mai mică decât circa 0,05 mm), dimensiunea grăunțelii se poate calcula cu suficientă aproximație cu relația Stokes:

$$v = \frac{2}{9} \frac{r^2 g (\rho - \rho_1)}{\mu} \quad (1)$$

în care:

- v este viteza limită de cădere (în timp), în cm/s;
 g — accelerația gravitației terestre, 981 cm/s²;
 ρ — masa specifică a elementului care cade, în g/cm³;
 ρ_1 — masa specifică a lichidului, în g/cm³;
 μ — viscozitatea absolută a lichidului, în poise, $\frac{g}{cm \cdot s}$.

Cu ecuația (1) s-au calculat vitezele-limită de cădere (simptotice) și durata corespunzătoare de sedimentare pe o înălțime h , pentru o suspensie cu elemente solide cu dimensiuni de 50 μ , 20 μ , 10 μ și 5 μ , cu greutatea specifică de 2,5 și 2,7 kg/dm³ (Tabela 4).

Pentru determinarea compoziției granulometrice a rocilor petrolifere prin sedimentometrie, se fierbe o cantitate de circa 10 g din fracțiunea trecută printr-o sită fină (cu diametrul ochiului de 0,074 sau de 0,053 mm) din materialul sfărâmat, timp de 20 minute într-o soluție de pirofosfat de sodiu cu o concentrație de 0,01%. După răcire, se diluează suspensia cu soluție de pirofosfat de aceeași concentrație, astfel încât concentrația suspensiei în material solid să fie sub 1% (în gama de concentrații de 1–4%, intervin abateri de la legea de cădere menționată, datorită stinjenirii reciproce a particulelor).

Cantitatea de un litru de suspensie astfel preparată, conținând o cantitate G_1 de circa 10 g de material solid, este turnată în cilindru gradat de un litru, cu diametrul de 60 mm și cu înălțimea de 400 mm, al aparatului reprezentat în fig. 3.

În acest cilindru, menținut la +20°C cu ajutorul unei băi cu termostat, se introduce pînă la adîncimea H sub nivelul lichidului, orificiul de tragere al unei pipete de 20 cm³, în care se poate aspira lichid, datorită vidului parțial provocat de scurgerea apei din vasul de pe pedestal.

După trecerea unei durate de timp corespunzătoare sedimentării pe înălțimea H a limitei clasei granulometrice cercetate, se trage cu pipeta un volum de probă $V_1 = 20$ cm³, care se trece pe o sticlă de ceas, unde se evaporă prin încălzire moderată, uscîndu-se apoi prin încălzire la +107°C, pînă la greutate constantă.

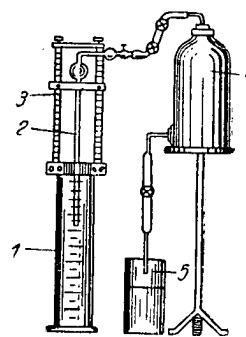


Fig. 3. Aparat pentru analiza sedimentometrică după (Cotiahov):
 1 — cilindru de sedimentare de 1000 cm³; 2 — pipeta de 20 cm³; 3 — cadru-scară, etalonat; 4 — vas cu apă pentru provocat depresiune în 2; 5 — vas de evacuare din 4.

Tabela 4. Viteza și durata de sedimentare în soluție de pirofosfat de Na, 0,01% ale particulelor solide cu greutatea specifică de 2,5–2,7 kg/dm³ și cu dimensiunile de 50 μ ... 5 μ

Diametrul particulei mm	Temperatura °C	Viteza de sedimentare, în cm/s pentru o particulă solidă cu γ_1		Timpul de sedimentare pînă la h , pentru o particulă solidă cu γ_1 egală cu											
				$h = 10$ cm				$h = 20$ cm				$h = 30$ cm			
		2,7	2,5												
0,05	5	0,151	0,133	ore	min	s	ore	min	s	ore	min	s	ore	min	s
	10	0,175	0,154	—	—	66,2	—	—	75,2	—	2	12	—	3	19
	15	0,200	0,177	—	—	57,1	—	—	64,9	—	1	54	—	2	51
	20	0,226	0,199	—	—	50,0	—	—	56,5	—	1	40	—	2	30
	25	0,253	0,225	—	—	44,2	—	—	50,3	—	1	24	—	2	12
	30	0,281	0,249	—	—	39,5	—	—	44,4	—	1	19	—	1	58
0,02	5	0,0255	0,0215	—	6	32	—	7	45	—	13	04	—	15	30
	10	0,0290	0,0255	—	5	45	—	6	32	—	11	30	—	13	04
	15	0,0330	0,0290	—	5	03	—	5	45	—	10	06	—	11	30
	20	0,0375	0,0325	—	4	27	—	5	08	—	8	47	—	10	16
	25	0,0420	0,0365	—	3	58	—	4	34	—	7	56	—	9	08
	30	0,0465	0,0410	—	3	35	—	4	04	—	7	10	—	8	08
0,01	5	0,00609	0,00538	—	27	20	—	31	00	—	54	40	—	62	00
	10	0,00707	0,00624	—	23	35	—	26	40	—	47	10	—	53	20
	15	0,00813	0,00716	—	20	30	—	23	15	—	41	00	—	46	30
	20	0,00918	0,00810	—	18	10	—	20	35	—	36	20	—	41	10
	25	0,01039	0,00917	—	16	00	—	18	10	—	32	00	—	36	20
	30	0,01161	0,01250	—	14	20	—	16	15	—	28	40	—	32	30
0,005	5	0,00152	0,00134	1	49	—	2	04	—	3	38	—	4	08	—
	10	0,00177	0,00156	1	34	—	1	47	—	3	34	—	3	42	—
	15	0,00203	0,00179	1	22	—	1	33	—	2	44	—	3	06	—
	20	0,00230	0,00203	1	13	—	1	22	—	2	26	—	2	44	—
	25	0,00260	0,00220	1	04	—	1	13	—	2	08	—	2	26	—
	30	0,00290	0,00256	0	57	—	1	05	—	2	54	—	2	10	—

Se repetă operația pînă cînd diferența de greutate dintre două determinări consecutive scade sub $\pm 0,0004$ g.

Dacă:

p este cantitatea (ponderală) de material din clasa granulometrică respectivă, conținută în cilindru;
 V — volumul cilindrului, 1 000 cm³;
 V_1 — volumul pipetei, 20 cm³;
 G — cantitatea de material solid extras cu pipeta, rezultă:

$$p = G \frac{V}{V_1} = 50 G. \quad (2)$$

Dacă:

G_1 este cantitatea (ponderală) de material solid conținută inițial în cilindru de obicei 10 g;

γ_1 — procentul de material solid din rocă, trecut prin sita fină (0,074 sau 0,053 mm),

valoarea fracțiunii granulometrice k (suma fracțiunilor Δg_i mai fine decît diametrul corespunzător timpului de sedimentare folosit), este

$$k = \frac{G \cdot V \cdot l}{V_1 G_1} = 5 G \cdot l. \quad (3)$$

Pentru calculul vitezelor și al duratelor de sedimentare ale particulelor cu diametre diferite și greutatea specifice diferite de cele indicate în tabela 1, se folosesc datele din tabela 5.

Tabela 5. Proprietățile fizice ale soluției de 0,01% pirofosfat de sodiu în apă distilată

Temperatura, °C	Greutatea specifică, kg/dm ³	Viscozitatea absolută, poise	Temperatura, °C	Greutatea specifică, kg/dm ³	Viscozitatea absolută, poise
10	0,99975	0,013100	21	0,99800	0,009970
15	0,99916	0,011650	22	0,99780	0,009725
16	0,99900	0,011325	23	0,99760	0,009500
17	0,99880	0,011025	24	0,99735	0,009280
18	0,99860	0,010740	25	0,99711	0,009075
19	0,99845	0,010480	30	0,99577	0,008000
20	0,99826	0,010210			

Analiza prin acest procedeu a fracțiunilor mai mici decît 0,010... 0,005 mm nu este recomandabilă, deoarece erorile datorite abaterii vitezei de sedimentare față de cele date de ecuația (1) devin importante, din cauza sarcinilor electrice eventuale ale particulelor, cum și din cauza duratei mari a determinărilor. Pentru continuarea analizelor în acest domeniu, se face uz în ultimul timp de sedimentarea prin centrifugare, cu accelerații de ordinul a 10³...10⁴ g, procedeu delicat și neieșit încă din faza de cercetări de laborator.

b) Interpretarea rezultatelor. Rezultatele analizei granulometrice, utile în exploatare pentru studiul zăcămintului și pentru combaterea viiturilor de nisip, se reprezintă grafic mai

adesea ca în fig. 1. Pentru scopuri practice, compoziția granulometrică poate fi exprimată suficient prin:

1) Diametrul mediu (sau echivalent) al grăuntelui, d_e , calificativul de «mediu» referindu-se la un grăunte uniform mediu, sferic, care ar conferi nisipului aceleași însușiri față de curgerea fluidelor.

Pentru clase granulometrice restrînse, diametrul echivalent poate fi luat, cu suficientă aproximație, egal cu media aritmetică $\frac{d_i + d_{i+1}}{2} = d_{mi}$, în care d_i și d_{i+1} sînt di-

metrele orificiilor sitei care încadrează clasa granulometrică respectivă.

Cînd clasa granulometrică nu este prea restrînsă, ameliorarea evaluării diametrului ei mediu poate fi obținută cu relația:

$$d_{mi} = \frac{3}{\frac{1}{d_i} + \frac{2}{d_i + d_{i+1}} + \frac{1}{d_{i+1}}} \quad (4)$$

Diametrul obținut cu această relație este inferior celui dat de media aritmetică, cu:

$$\text{circa } 4,4\% \quad \text{cînd} \quad \frac{d_{i+1}}{d_i} = 1,5$$

$$\gg 3,2\% \quad \gg \quad \frac{d_{i+1}}{d_i} = 1,4$$

$$\gg 2,0\% \quad \gg \quad \frac{d_{i+1}}{d_i} = 1,3$$

$$\gg 0,9\% \quad \gg \quad \frac{d_{i+1}}{d_i} = 1,2$$

$$\gg 0,3\% \quad \gg \quad \frac{d_{i+1}}{d_i} = 1,1$$

Diametrul echivalent (mediu) al unui nisip cu elemente cuprinse în multe clase poate fi calculat cu:

$$\text{— media ponderată: } d_e = \sqrt[3]{\frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i}} \quad (5)$$

unde

d_i este diametrul mediu al clasei de ordinul i ;

n_i — numărul de elemente al clasei de ordinul i , însumarea referindu-se la clasele granulometrice i ;

— sau media armonică ponderată a diametrelor medii:

$$d_e = \frac{1}{\sum_{i=0}^n \frac{\Delta g_i}{d_i}} \quad (6)$$

în care

d_i este diametrul mediu al clasei de ordinul i ;

Δg_i — fracțiunea ponderală a clasei de ordinul i ;

— sau, pentru roci cu fracțiune fină mai importantă:

$$d_e = \frac{1}{\sum_{i=2}^{i=n} \frac{\Delta g_i}{d_i} + \frac{3}{2} \frac{\Delta g_1}{d_1}} \quad (7)$$

— sau media după metoda Zamarin:

$$d_e = \frac{1}{\sum_{i=2}^{i=n} A_i \cdot \ln \frac{d_i}{d_{i-1}} + \frac{3}{2} \frac{\Delta g_1}{d_1}} \quad (8)$$

unde A_i este coeficientul unghiular față de axa $\vec{O\vec{d}}$ al coardei de ordinul i a curbei de compoziție granulometrică, sau

$$A_i = \frac{\Delta g_i}{d_i - d_{i-1}} \quad (9)$$

— metoda expeditivă a «diametrului de 10%», care constă în aceea că pentru d_e se ia o valoare egală cu diametrul la care suma fracțiunilor ponderale inferioare (ca dimensiuni) ale curbei de compoziție granulometrică atinge 10% din greutatea probei întregi.

Această ultimă metodă este aplicabilă în cazul cînd $0,1 \text{ mm} < d_e < 0,30 \text{ mm}$ și cu condiția ca coeficientul de neuniformitate granulometrică al probei [Cap. III, B.b.2.b) 2)] să nu depășească valoarea 5.

2) Coeficientul de neuniformitate granulometrică. Acest coeficient reprezintă raportul dintre diametrul d_{60} la care curba de compoziție granulometrică atinge ordonata $\Sigma \Delta g_i = 60\%$ din greutatea probei (fracțiuni fine) și diametrul d_{10} la care curba a atins ordonata $\Sigma \Delta g_i = 10\%$. Un nisip cu grăunțe de același diametru (de exemplu, sortat) are acest coeficient egal cu 1. Nisipurile cu fracțiuni foarte diferite au coeficienți cu valori mult mai mari, în practică sub 10^2 .

3) Coeficientul de «disimetrie» la repartitia diferitelor fracțiuni, definit ca:

$$S \doteq d_{50} - \frac{1}{2} (d_{90} + d_{10}) \quad (10)$$

4) Coeficientul de concentrație al claselor în jurul dimensiunii medii, definit ca:

$$K = \frac{d_{75} - d_{25}}{2 (d_{90} - d_{10})} \quad (11)$$

Coeficienții S și K au deocamdată o utilizare pur descriptivă.

3. **Porozitatea. Definiții.** Porozitatea rocilor-magazin este volumul specific de goluri ale rocii (raportul dintre suma volumelor porilor și suma volumelor elementelor minerale compacte care alcătuiesc roca, plus volumul porilor, volumul rocii brute). Deși porozitatea variază puțin cu presiunea și mai puțin cu temperatura (a cărei influență este practic neglijabilă), dar este sensibilă la acțiunea fizico-chimică a agenților modificatori, valoarea ei nominală este exprimată prin raportul volumelor respective în condiții standard, cu proba uscată la exicator pînă la greutate constantă, la 1 ata și la 0°C .

Se distinge:

— *porozitatea absolută*, adică raportul dintre suma tuturor volumelor porilor rocii și volumul ei brut,

— *porozitate efectivă*, adică raportul dintre suma volumelor acelor pori care comunică cu rețeaua generală de pori (cu excluderea porilor izolați sau a acelor care constituie grupuri mici cu comunicație reciprocă, dar fără comunicație cu rețeaua generală) și volumul brut al rocii. Diferența, teoretic rigidă, este atenuată în natură de imperfecțiunea comunicațiilor dintre pori și a condițiilor de curgere, în special, în rocile magazin saturate multifazic și supuse la mari variații de gradient de presiune.

— *porozitatea dinamică*, raport în al cărui numărător intră volumul de pori efectiv folosiți la curgere. Ea nu este o proprietate strict specifică a rocii deoarece crește cu gradientii de presiune tinzînd asimptotic către o valoare limită, cu puțin inferioară porozității efective.

La stabilirea cantității de hidrocarburi existente în zăcămint în starea sa inițială trebuie, teoretic, luată în considerație porozitatea abso-

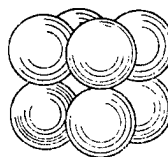


Fig. 4. Element de rocă fictivă cu rețea cubică (vedere).

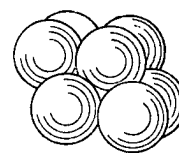


Fig. 5. Element de rocă fictivă cu rețea romboedrică (vedere).

lută. Pentru majoritatea scopurilor practice, însă, determinarea porozității efective este suficientă.

Din studiul geometric al rocilor fictive (roci constituite din elemente sferice echidimensionale, așezate uniform în spațiu, după o lege oarecare) rezultă că acestea pot avea porozități între 0,2595, pentru așezarea cea mai compactă (rețeaua romboedrică regulată, fig. 4) și 0,4764 pentru așezarea cea mai afînată (fig. 5).

Considerind cubul ca un caz particular al romboedului (cazul cu unghiul θ adiacent axei de simetrie, al triedrului, egal cu 90°),

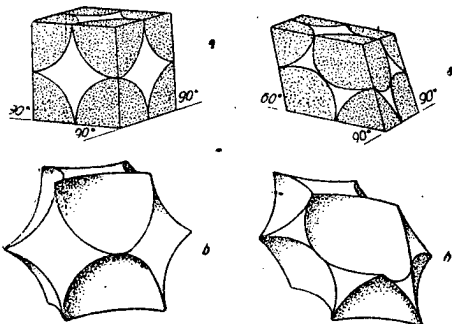


Fig. 6. Element de rocă fictivă cu rețea cubică: a) reprezentare schematică a părților pline; b) reprezentare schematică a părților goale.

Fig. 7. Element de rocă fictivă cu rețea romboedrică: a) reprezentare schematică a părților pline; b) reprezentare schematică a părților goale.

se poate urmări variația porozității cu unghiul θ , între aceste limite (v. tabela 6).

Se poate demonstra că porozitatea are valoarea

$$m = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \theta)(\sqrt{1 + 2 \cos \theta})} \dots (12)$$

Pentru studiul proprietăților de curgere (permeabilitate) interesează și raportul dintre secțiunea de trecere minimă rămasă între grăunule și secțiunea brută a rocii, n :

$$n = 1 - \frac{\pi}{4 \sin \theta} \dots (13)$$

Tabela 6. Valorile porozității și ale secțiunii specifice libere minime, în funcție de unghiul θ

Unghiul θ		m	n	Unghiul θ		m	n
grade	minute			grade	minute		
60	00	0,2595	0,0931	68	18	0,3700	0,1549
60	02	0,2600	0,0937	69	17	0,3800	0,1605
60	41	0,2700	0,0993	70	20	0,3900	0,1661
61	18	0,2800	0,1045	71	28	0,4000	0,1719
61	55	0,2900	0,1098	72	43	0,4100	0,1775
62	36	0,3000	0,1155	74	03	0,4200	0,1832
63	18	0,3100	0,1210	75	32	0,4300	0,1902
64	03	0,3200	0,1266	77	10	0,4400	0,1946
64	49	0,3300	0,1322	79	06	0,4500	0,2003
65	37	0,3400	0,1378	81	25	0,4600	0,2057
66	27	0,3500	0,1434	84	59	0,4700	0,2117
67	21	0,3600	0,1491	90	00	0,4764	0,2146

Dintre aceste poziții relative, cea mai mare probabilitate o are cea mai compactă, aceea cu $\theta = 60^\circ$, care este, din punct de vedere mecanic, și cea mai stabilă. În tabela 7 sînt date, în funcție de dimensiunea elementului, câteva dintre proprietățile geometrice ale poro-

zității, care prezintă interes din punctul de vedere al fenomenelor molecular-superficiale (determinate de suprafața specifică) și al fenomenelor de scurgere (secțiunea porilor și numărul de pori).

Tabela 7. Proprietățile geometrice ale porilor unei roci fictive, în funcție de dimensiunea elementului

Sita, ochiuri/foi	Diametrul grăunțului, mm	Secțiunea liberă minimă, mm ² /por	Suprafața specifică a grăunților, m ² /m ³	Numărul specific de pori, în milioane de pori pe un metru cub de rocă
10	1,651	0,1409	2,508	289,5
14	1,168	0,0697	3,568	833,0
20	0,833	0,0355	4,986	2 310,0
28	0,539	0,0177	7,110	6 515,0
35	0,417	0,0088	10,000	18 290,0
48	0,295	0,0044	14,115	51 600,0
65	0,208	0,0022	20,060	174 400,0
100	0,147	0,0011	28,360	417 800,0
150	0,104	0,0005	40,140	1 799 000,0
200	0,074	0,0003	55,700	3 274 000,0
300	0,050	0,0001	82,820	10 590 000,0

a) Porozitatea rocilor reale cu grăunți eterodimensionali este, în general, mai mică decît aceea a rocilor fictive, grăunții mai mici putînd ocupa interstițiile lăsate de cei mari și reducînd porozitatea ansamblului. În rocile cu elemente de forme foarte diferite, unele aproape sferice, iar altele în formă de fulgi (mice),

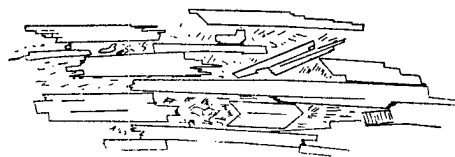


Fig. 8. Textură anormală de rocă cu porozitate mare (elemente lamelare).

se pot forma unele texturi cu porozitate mai mare, prin așezări de felul celei reprezentate în fig. 8.

În realitate, astfel de texturi, cu stabilitate redusă, există în natură pe scară foarte redusă. Texturi cu porozitate mare există și la unele calcare (celulare, în fagure), practic nepetro-lifere.

Porozitățile rocilor-magazin producătoare de țiței, au valori între 10 și 30%.

Porozitățile mai mari sînt rare, iar cele mai mici determină, în general, neeconomicitatea exploatarei (afară de condiții particulare favorabile: presiuni de zăcămint mari, conținut mare în hidrocarburi cu greutate moleculară mică, care conferă o mare mobilitate țițeiului, dimensiunea medie relativ mare a grăunțului, grosime considerabilă a stratului).

Porozitatea originală a rocii poate fi influențată în rău prin procese de diageneză sau de

sporire a volumului unora dintre elementele minerale constituente sau poate fi influențată favorabil prin procese de dizolvare.

În cazul zăcămintelor de calcare compacte fisurate sau cavernoase, noțiunea de porozitate este, bine înțeles, cu totul alterată, deoarece raportul definit ca «porozitate» poate fi în acest caz, de ordinul a 1% sau chiar mai mult inferior în calcare foarte productive. Explicația fenomenului constă în neregularitatea foarte mare a repartiției spațiilor goale în aceste roci.

b) *Determinarea porozității.* Dacă se notează cu:

V_b — volumul brut al rocii;

V_g — volumul spațiilor goale;

V_m — volumul elementelor minerale solide, porozitatea poate fi determinată cu două mărimi (oricare) dintre mărimile următoare:

$$m = \frac{V_g}{V_b} = \frac{V_b - V_m}{V_b} = \frac{V_g}{V_g + V_m} \quad (14)$$

În general, indiferent de modul prin care se măsoară sau se deduce numitorul, metodele care măsoară direct pe V_g determină valoarea porozității efective, iar cele care măsoară direct pe V_m , determină valoarea porozității absolute. Din cauza marelui număr de metode de lucru, este însă necesar ca, pentru fiecare metodă de ansamblu, să se examineze care este porozitatea dedusă.

c) *Metode de determinare a volumului brut al probei V_b .* Aceste metode sînt clasificate în: 1) metode bazate pe cufundarea într-un lichid care nu pătrunde în pori (mercurul) și pe măsurarea sporului de volum aparent al lichidului; 2) metode bazate pe cîntărirea probei înainte și după saturarea completă cu un lichid cu greutatea specifică cunoscută și nu prea volatil (de exemplu, tetraclorețanul, $C_2Cl_4H_2$) sau pe sporirea volumului aparent al unei anumite cantități din lichidul în care se cufundă proba în prealabil saturată; 3) metode bazate pe acoperirea probei cu o peliculă subțire impermeabilă (parafină, colodiu etc.) cu greutatea cunoscută prin cîntăriri efectuate înainte și după acoperire, cu volum cunoscut datorită diviziunii greutății materialului de acoperire prin greutatea lui specifică, urmată de cîntărirea în aer și în apă a probei astfel preparate, ceea ce dă greutatea și, deci, volumul apei dezlucite; din volumul brut al probei astfel preparate, se scade volumul materialului de acoperire și se obține volumul brut al probei neacoperite; 4) dacă proba are o formă relativ regulată, volumul ei se poate calcula prin procedee geometrice; 5) V_b poate fi considerat egal cu $V_g + V_m$, cînd V_g se obține prin măsurare directă și cînd V_m se calculează împărțind greutatea probei prin densitatea medie a elementelor ei minerale

(în special cînd roca este aproape monominerală, gresii sau nisipuri predominant silicioase, densitatea cuarțului $\sim 2,65$).

1) *Metode bazate pe cufundarea probei în mercur.* Aceste metode se aplică numai la probele care au o rezistență mecanică suficientă pentru a nu se dezagrega sub acțiunea gradientului de presiune ridicat, datorită densității mari a mercurului.

Metodele folosite sînt:

α) Cîntărirea probei uscate în aer, urmată de cufundarea ei în Hg și de determinarea (forței necesare pentru a o cufunda, ceea ce dă greutatea mercurului dezlucit, respectiv volumul brut al probei.

β) Cîntărirea unui picnometru în două situații: întii, plin cu mercur, apoi cu proba în interior și completat cu mercur. Diferența dintre cele două cîntăriri este egală cu diferența dintre greutatea volumului de mercur dezlucit și greutatea probei.

γ) Umplerea, parțială cu mercur a unei biurete analitice, cufundarea probei în mercur și notarea sporului de volum aparent al mercurului (procedeu complicat deoarece intervin mulți factori de corecție).

δ) Folosirea unui aparat de tipul celui reprezentat în fig. 9 (volumetru-eprubetă). O eprubetă cu extremitățile lărgite, formînd bulbi de aproximativ aceeași capacitate, cu porțiunea medie gradată, are capătul închis cu dop șlefuit. Se toarnă o cantitate de Hg cu foarte puțin mai mare decît capacitatea bulbului superior, se astupă, se răstoarnă cu dopul în jos, se notează nivelul. Se răstoarnă, se deschide, se introduce proba, se astupă și se răstoarnă din nou. Se notează noul nivel al mercurului deplasat din cauza volumului probei, care se calculează prin diferență.

ε) Folosirea unui aparat de tipul celui reprezentat în fig. 10. Aparatul este compus din: robinetul cu trei căi 1, rezervorul 2, tubul gradat 3, recipientul de probă 4, dopul șlefuit și tubul semicapilar 5.

Modul de lucru. Se introduce în recipientul 4 o cantitate de mercur suficientă pentru a umple atît recipientul cît și porțiunea inferioară a tubului U. Se introduce dopul în gîtul recipientului 4, ceea ce provoacă o ridicare a nivelului mercurului în tuburile 5 și 3.

Cu ajutorul robinetului 1, care pune aparatul în legătură cu o pompă de vid și al robinetului 6 de amortizare, se ajustează nivelul mercurului în tubul 5, la reperul a-a și se

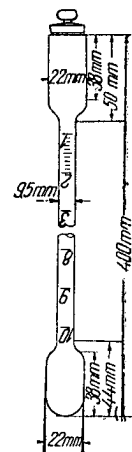


Fig. 9. Volumetru-eprubetă cu Hg (diametrele cotate se referă la dimensiunile interioare).

notează nivelul mercurului în tubul gradat 3. Cu ajutorul aceleiași pompe de vid se golește de mercur recipientul 4, mercurul trecând în rezervorul 2, se scoate dopul, se introduce

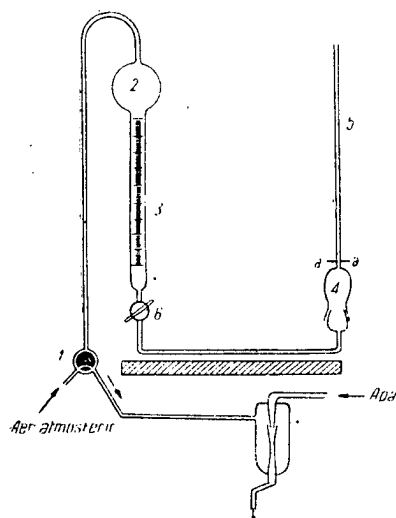


Fig. 10. Aparat pentru determinarea volumului brut al probelor. (Reprezentare schematică după aparatul Laboratorului S.R.P. Cimpina).

proba, se fixează din nou dopul pentru a nu fi scos prin efectul de plutire și, prin deschiderea robinetului 1 către atmosferă, se lasă să revină mercurul în recipientul 4, până la reperul a-a; în acest moment se citește pe tubul gradat 3 nivelul mercurului; diferența dintre cele două poziții dă volumul probei.

2) Metode bazate pe determinări asupra unor probe saturate cu lichid cu viscozitate mică.

α) Metoda gravimetrică. Proba, spălată prin distilare extractivă și uscată, este saturată prin introducerea ei alternată în vid și în lichidul folosit. În acest scop se folosește un lichid cu viscozitate mică, cu densitate relativ mare, cu volatilitate cât mai redusă, care udă cit mai bine porii rocii (lampant, benzen, tetraclorețan etc.). Prin cântărirea probei în aer, înainte și după saturare, se poate deduce greutatea lichidului care saturează porii și, deci volumul acestora, V_g . Metoda prezintă avantajul că, prin cântărirea cu balanța lui Arhimede a probei cufundate în lichid, se poate deduce în același timp și greutatea volumului de lichid dezlucuit de elementele minerale solide și, deci, V_m , iar $V_m + V_g = V_b$.

β) Metoda volumetrică. Se folosește un aparat de tipul celui reprezentat în fig. 11, în principiu, un picnometru. Două tuburi semicapilare comunică la un capăt cu rezervorul A,

iar la celălalt, cu rezervorul B. Acesta este demontabil, datorită îmbinării pe suprafața conică șlefuită. Prin construcție, capacitatea rezervorului A până la reperul N, este egală cu capacitatea rezervorului B până la reperul M.

Se toarnă în aparat (răsturnat cu rezervorul B în sus) o cantitate de tetraclorețan, suficientă pentru a umple rezervorul A și a depăși puțin reperul N. Se notează această depășire Δ_N . Se introduce proba saturată cu tetraclorețan în vasul B, se închide, se întoarce aparatul și se notează înălțimea Δ_M cu care nivelul lichidului depășește reperul M. Dacă proba ar fi fost absentă, s-ar fi observat $\Delta_N = \Delta_M$. Dacă se notează cu Ω secțiunea ambelor tuburi volumul probei este

$$V_b = (\Delta_M - \Delta_N) \Omega, \quad (15)$$

în unități de volum corespunzătoare celor de lungime pentru Δ_M și Δ_N și de suprafață pentru Ω .

3) Metode bazate pe cântărirea probei în aer și pe scufundarea ei într-un lichid im-piedicat de a intra prin acoperirea acesteia. Proba se acoperă, de obicei, prin pulverizare, pentru a reduce la minimum probabilitățile de erori datorite pătrunderii în pori a materialului de acoperire, înainte de trecerea acestuia din starea lichidă în starea solidă. Astfel, se preferă în general, colodiului parafina topită atit din cauza solidificării ei rapide, cit și din cauza viscozității ei mari, la temperatura efectivă de lucru. Fie că se ia pentru parafină densitatea $D_{20} = 0,906$ și, în acest caz, pentru reducerea erorilor, stratul depus trebuie să fie cit mai subțire, cel mult 2% din greutatea probei, fie că se determină cu precizie densitatea parafinei respective la temperatura de lucru și, în acest caz, se pot folosi și cantități mai mari de parafină, corecția trebuie făcută îngrijit, iar proba este sensibil alterată, recondiționarea ei pentru alte determinări fiind aleatorie dacă roca nu este suficient consolidată.

Dacă:

P_1 este greutatea probei inițiale în aer;

P_2 — greutatea probei acoperite în aer;

ρ_d — greutatea specifică a materialului de acoperire;

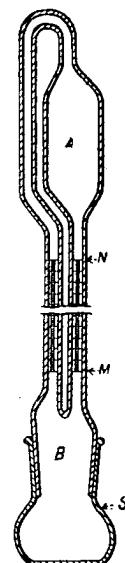


Fig. 11. Volumetru cu tetraclorețan; S — balon pentru probă; B — spațiul destinat probei; A — spațiul de comparație; N și M — începuturile scării semicapilarelor.

ρ_a — greutatea specifică a apei la temperatura de lucru, cu balanța lui Arhimede;

P_3 — greutatea probei acoperite, în apă,

rezultă

$$V_b = \frac{P_2 - P_3}{\rho_a} - \frac{P_2 - P_1}{\rho_p} \quad (16)$$

4) Metodele bazate pe procedee geometrice sau mecanice, pe planimetric, pe mulaje urmate de umplerea cu mercur și de cîntărire etc., sînt în general, mai greoaie și mai puțin exacte decît cele descrise mai înainte.

5) Alte metode: v. metodele pentru determinarea volumelor V_g și V_m .

d) Metode de determinare a volumului net al probei sau a volumului elementelor minerale V_m . Afară de metodele indicate prin care V_m se determină ca $V_m = V_b - V_g$, există următoarele metode directe:

1) Metoda aproximativă. Greutatea probei se divide prin densitatea probabilă a elementelor minerale care o alcătuiesc. Rocile-magazin silicioase sau silico-argiloase, în majoritatea lor, au elemente cu greutatea specifică între 2,65 și 2,70.

Pe baza unui simplu examen petrografic vizual și a rezultatelor experimentale anterioare, această densitate poate fi apreciată cu o eroare uneori chiar mai mică decît 1%, ceea ce permite să se obțină o valoare acceptabilă pentru V_m , în special în cazul rocilor cu porozitate mare. Cu cît porozitatea rezultat din calcul este mai mică, cu atît eroarea probabilă astfel comisă este mai mare.

2) Metoda exactă. Densitatea medie efectivă a elementelor minerale ale probei se determină cu ajutorul unui picnometru și al unui lichid care nu provoacă alterări fizico-chimice acestor elemente, după sfărîmarea probei, cînd se determină compoziția granulometrică (a tuturor claselor granulometrice, deoarece densitatea medie se poate deosebi mult de la o clasă la alta). Densitatea astfel determinată este utilizată în mod analog cu cazul precedent.

e) Metode de determinare a volumului porilor probei V_g . Afară de metodele prin care se determină V_g ca $V_g = V_b - V_m$, cu care se obțin în general, pentru V_g valorile corespunzătoare porozității absolute sau totale, există următoarele metode directe:

1) Metoda prin saturație indirectă la (2 a), unde s-a descris determinarea indirectă a volumului brut ca $V_b = V_g + V_m$.

2) Metoda evacuării totale de gaze a porilor probei, urmată de măsurarea cantităților de gaz recoltat, în condițiile standard. Se folosește un aparat de tipul celui reprezentat în fig. 12, care este în același timp un recipient al probei, A și o pompă de

vid cu mercur, acționată prin denivelare: vasului cu mercur D.

Proba A cu un volum total de circa 10–20 cm³, cu porii saturați cu aer uscat la presiune atmosferică, este introdusă în aparat. Prin

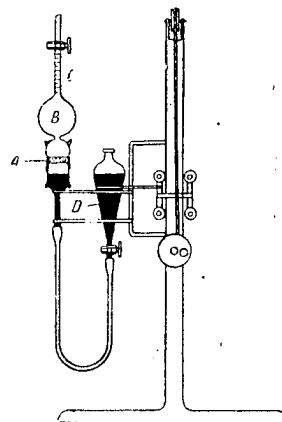


Fig. 12. Aparat pentru măsurarea spațiului porilor comunicați cu ajutorul vidului:

A — proba; B — spațiul de detenție; C — capilar etalonat; D — vas cu Hg, deplasabil pe verticală (pompa cu mercur).

ridicarea vasului D se provoacă ridicarea nivelului mercurului pînă la robinetul C, eliminînd aerul din ramura cu probă a aparatului. Se închide robinetul C și, coborînd nivelul mercurului cu ajutorul vasului D, se provoacă formarea unui vid în vasul B, vid care obligă aerul din porii probei să se desîndă pînă la presiunea foarte mică din vasul B. Prin readucerea vasului D cu nivelul la același cotă cu nivelul din tubul C, se asigură în acesta o presiune egală cu aceea a camerei. Datorită secțiunii reduse a tubului C volumul de aer din el (extras din porii probei) poate fi măsurat cu precizie. Trebuie observat că în porii probei a mai rămas o cantitate de aer

egală cu fracțiunea $\frac{P_m}{P_c}$ din cantitatea inițial conținută, P_c fiind presiunea aerului din cameră, iar P_m — presiunea minimă absolută atinsă prin aplicarea denivelării cu mercur. Dacă se urmărește o aproximație superioară, se elimină acest aer și se repetă extracția.

Dacă se admite că în ambele cazuri $\frac{P_m}{P_c} \approx 10^{-2}$,

se poate obține valoarea lui V_g cu o eroare relativă de 10^{-4} . Procedul se poate repeta, pentru a obține o aproximație și mai bună.

Prin modificarea părții ABC a aparatului, acesta poate fi transformat pentru măsurarea directă a lui V_b , ca la aparatul, din fig. 10 obținîndu-se astfel, ambele elemente pentru calculul porozității.

3) Metoda evacuării parțiale de gaze. Porozimetrul cu expansiune, porozimetrul Boyle-Mariotte.

Prin această metodă se măsoară volumul efectiv al porilor intercomunicanți, prin diferența $V_b - V_m = V_g$. Astfel, se supune unei detente cantitatea de gaze cuprinsă la o presiune inițială P_i într-o celulă de presiune, al cărei volum V_1 , tarat, este redus de prezența volumului V_m al elementelor minerale ale probei inclusiv volumul porilor necomunicanți. Din ecuația Boyle-Mariotte-Gay Lussac corectată pentru abaterea gazului real folosit, se poate deduce volumul de gaz care s-a desțins efectiv și deci, V_m și V_g .

În practică se folosesc două procedee:

α) Procedeu cu două celule: celula principală, de presiune cu volumul interior V_1 , cuprinde proba de rocă la presiunea inițială P_i ; celula de detentă cu volumul interior V_2 este umplută, în situația inițială, cu gaz de aceeași natură la presiunea inițială P_i . Presiunile P_i sînt valorile absolute deduse din cele indicate de manometrele fiecăreia, celulele fiind ținute la aceeași temperatură. După punerea în comunicație a celor două celule și după stabilirea echilibrului termic și de presiuni, se măsoară și se deduce presiunea finală P_f a ansamblului.

Pe baza acestor elemente se poate deduce V_m cu ecuația:

$$\frac{P_{i1}(V_1 - V_m)}{Z_i} + \frac{P_{i2}V_2}{Z_2} = \frac{P_f(V_1 + V_2 - V_m)}{Z_f} \quad (17)$$

în care:

- Z_1 este coeficientul de supra-compresibilitate (abatere de la legea gazelor perfecte al gazului la presiunea P_{i1} și la temperatura experienței);
- Z_2 — coeficientul de supra-compresibilitate (abatere de la legea gazelor perfecte al gazului la presiunea P_{i2} și la temperatura experienței);
- Z_f — coeficientul de supra-compresibilitate (abatere de la legea gazelor perfecte al gazului la presiunea P_f și la temperatura experienței).

Pentru exactitate, operația se poate continua punînd în comunicație recipientii cu volumele V_1 și V_2 , cu un al treilea recipient cu volumul V_3 și folosind din nou ecuația (17), în care se înlocuiește V_1 prin $V_1 + V_2$, iar V_2 , prin V_3 etc.

Această metodă fiind o metodă indirectă, prin diferență, exactitatea necesară a măsurilor introduse este relativ mare. Erorile pot fi: erori provocate de variațiile de temperatură, erori de tarare, erori comise asupra coeficienților Z_1 , Z_2 , Z_f care nu pot fi cunoscuți exact decât pentru gaze pure.

Se utilizează H, He sau A, care prezintă valori relativ mici pentru Z și care pot fi obținute mai ușor în stare de puritate satisfăcătoare.

β) Procedeu cu o singură celulă folosește aparatura reprezentată schematic în fig. 13.

O celulă de presiune C, conținută într-un termostat, este conectată prin ramura B la un manometru obișnuit de precizie, comparabil cu un manometru de referință, cu greutatea; prin ramura A, ea este corectată la o biuretă de sticlă gradată, conținută și ea într-o baie de apă cu termostat și în comunicație cu tubul și cu vasul cu mercur D, cu ajutorul căruia se poate modifica, între anumite limite, presiunea gazului aflat eventual în biuretă.

Cunoscut fiind volumul V_1 al celei C, se introduce proba în ea, se încarcă celula cu heliu (sau cu gazul ales), la o presiune de 4–5 kg/cm², se măsoară presiunea P_i , după stabilirea echilibrului de temperatură și de apă, prin deschiderea robinetului A și se lasă o parte din gaz să intre în biuretă. Se reglează nivelul vasului D la aceeași înălțime cu acela din biuretă, pentru a se asigura în ea aceeași presiune ca cea atmosferică din timpul experienței, măsurată cu un barometru separat.

Egalitatea nivelurilor se verifică cu catetometrul, după stabilirea echilibrului de temperatură. Volumul de gaz conținut în biuretă în această situație este V_2 , la presiunea $P_{f.2}$ (presiunea atmosferică din acel moment).

Cu ajutorul aceleiași legi se deduce:

$$\frac{P_i(V_1 - V_m)}{Z_i} = \frac{P_{f.1}(V_1 - V_m)}{Z_{f.1}} + \frac{P_{f.2}V_2}{Z_{f.2}} \quad (18)$$

unde:

- $P_{f.1}$ este presiunea rămasă în celulă după detentă;
- $P_{f.2}$ — presiunea rămasă în biuretă după egalizarea cu cea atmosferică;
- $Z_{f.1}$ — coeficientul de abatere de la legea gazelor perfecte al gazului, la presiunea $P_{f.1}$ și la temperatura experienței;
- $Z_{f.2}$ — coeficientul de abatere de la legea gazelor perfecte al gazului, la presiunea $P_{f.2}$ și la temperatura experienței.

Printr-o nouă deschidere a robinetului A se poate realiza o altă valoare V_2 , $P_{f.1}$, etc., obținîndu-se valori apropiate ale lui V_m .

În cazul ambelor metode, este necesar ca volumul brut al probei să fie cit mai apropiat de volumul celei, ceea ce se poate realiza printr-o tăiere corespunzătoare a probei.

Pentru a elimina erorile provocate de cauzele menționate, se recomandă să se verifice apa

ratul (și prin aceasta să se etaloneze dacă este necesar), determinând în loc de V_m volumul unor cilindri tarați (cel puțin doi), al căror volum să încadreze valoarea V_m .

Pentru calculul porozității fiind necesar și V_b , acesta poate fi determinat cu ajutorul

cient de saturație al rocii cu acel fluid sau, pe scurt, «saturația» în acel fluid. La rocile care conțin hidrocarburi se ia de obicei în considerație: 1) saturația în gaze, notată cu S_g ; 2) saturația în țiței, notată cu S_f ; 3) saturația în apă, notată cu S_a .

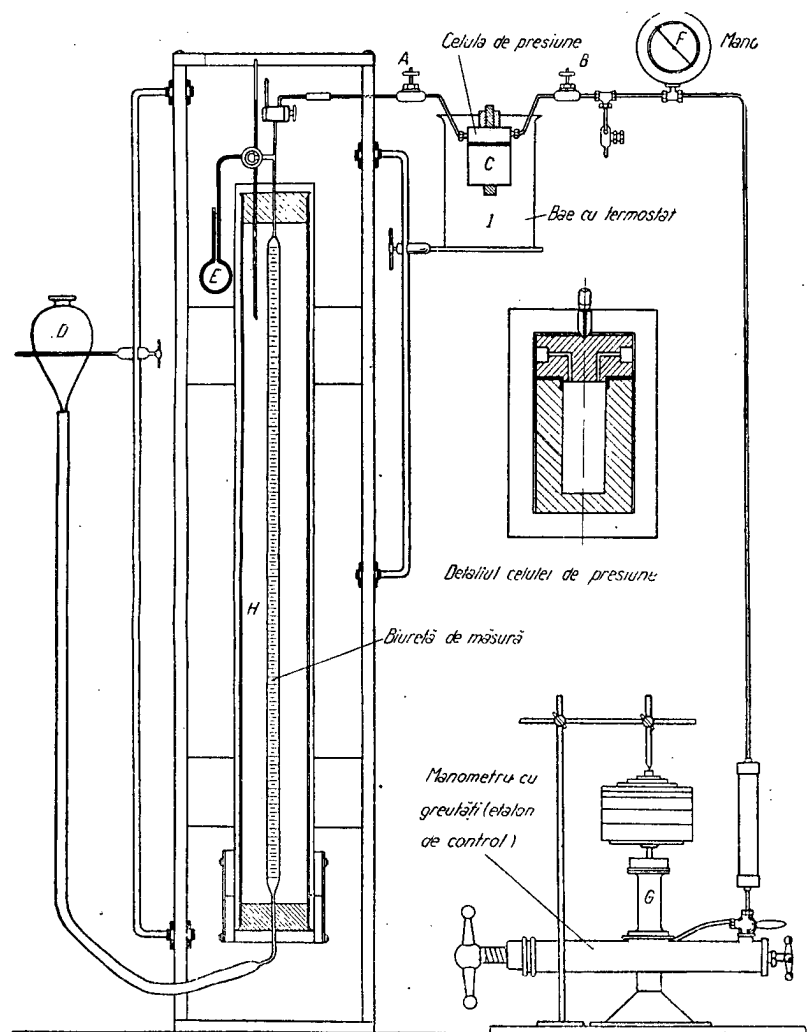


Fig. 13. Porozimetru cu expansiune, cu o singură celulă:

A — robinetul principal de lucru; B — robinetul de comunicație cu manometrele de control; C — celula pentru probă (celula de presiune); D — vas comunicant cu apă care servește și ca pompă cu apă și ca manometru diferențial cu apă; E — manometru cu mercur; F — manometru cu tub elastic, pentru control; G — manometru cu greutăți pentru etalonarea lui F; H — baia de apă-termostat a biuretei pentru recoltarea gazului evacuat din celulă; I — baia cu termostat a celulei C.

acestui aparat și prin aceeași metodă, după acoperirea cu parafină.

4. Saturația rocilor-magazin. Raportul dintre volumul ocupat efectiv de un anumit fluid conținut în porii unei roci-magazin și volumul total de pori al rocii este numit coefi-

Prin extinderea noțiunii de saturație în element străin rocii-magazin propriu-zise, se consideră uneori saturația în sare sau în săruri (exprimate de obicei ca echivalent în ClNa) și saturația în hidrocarburi solide, care în condiții speciale poate căpăta o mare importanță practică.

Trebuie evitată numirea scurtă de «saturația în sare», fără mențiunea explicativă «sare solidă în porii rocii», deoarece poate fi confundată cu noțiunea de saturație în sare a apei sărate conținute în porii rocii. Saturația în hidrocarburi solide nu poate fi determinată direct, prin procedeele de analiză existente.

Prin definiția însăși a saturației, suma saturațiilor unei roci trebuie să fie egală cu unitatea:

$$S_g + S_f + S_a = 1, \quad (19)$$

ca o consecință a egalității volumelor ocupate de fluide cu volumul disponibil.

Prin natura ei, saturația este o mărime variabilă în timp; de aceea se deosebesc, în practică: 1) saturațiile inițiale ale zăcămintului (în momentul deschiderii lui prin lucrări de exploatare); 2) saturațiile actuale ale zăcămintului (în momentul forajului prin care se recoltează carota a cărei saturație se examinează, cu un scurt timp înainte de atingerea rocii de către elementele tăietoare ale carotierei, suficient pentru a se evita alterarea saturației prin acțiunea fluidelor de sapă); 3) saturația reziduală de fund a carotei (după desprinderea ei de talpă, dar înainte de ridicarea ei și, deci, de reducerea sensibilă a presiunii exercitate asupra ei); 4) saturația reziduală de suprafață, în momentul cînd carota este extrasă la gura puțului din tubul carotier obișnuit, practic identică cu saturația cu care carota ajunge în laborator, dacă aceasta nu este ambalată și transportată defectuos; 5) saturația finală de zăcămint (în momentul cînd, în elementul respectiv de zăcămint, exploatarea — eventual numai faza primară a ei — încetează), 6) saturația finală de laborator (cea care există într-o carotă, asupra căreia s-au efectuat diferite experiențe, în laborator, reproducînd mai mult sau mai puțin exact fenomenele din zăcămint).

În laborator, se determină de obicei, saturațiile (4) și (6), celelalte fiind deduse, în general, indirect prin diferite metode mixte (de laborator și de calcul).

Saturațiile (1), (2) și (5) au o importanță excepțională din punct de vedere economic; obținerea exactă a lor depinde de înlăturarea a două efecte de alterare care au loc în mod normal la extragerea carotelor: a) contaminarea rocii-magazin cu fluide infiltrate din noroiul de sapă și b) pierderea de material fluid din porii carotei, din cauza trecerii acesteia de la presiunea relativ mare care există la fundul găurii de sondă, la presiunea atmosferică de la gura sondei.

În cazul saturației (5), predomină masiv, în general, efectul de alterare (a).

Pentru a elimina efectul de alterare (a) s-a încercat: α) folosirea de noroaie de sapă cu proprietăți de filtrație specială, foarte reduse, cu rezultate foarte nesatisfăcătoare; β) folosirea de fluide speciale de foraj cu filtrație riguros nulă, cu rezultate în general bune, în limita respectării stricte a condiției de filtrație nulă.

Pentru a corecta prin calcul efectul de alterare (a), s-a încercat folosirea de indicatori în noroiul de sapă. Prin indicatori se înțeleg acest caz, substanțe complet străine de roca-magazin, care fiind adăugate noroiului de sapă, să poată da, prin dozarea lor în carotă, în laborator, o măsură a fenomenului de dezlocuire a conținutului inițial al porilor rocii de către faza lichidă infiltrată din noroi. Chiar în cazul ipotetic al unui indicator perfect, el nu dă nici o indicație certă asupra naturii fluidului dezlocuit de filtratul din noroi. Măsura în care acest filtrat a dezlocuit selectiv diferitele faze fluide preexistente în carotă urmează să fie apreciată prin considerente care nu pot fi socotite riguros exacte (a se vedea curgearea fluidelor polifazice prin medii poroase). Cap. V F.)

Calitățile necesare unui bun indicator sînt: 1) să fie cu totul străin de rocă, astfel încît să nu existe riscul ca o eventuală prezență naturală a lui în rocă, chiar în cantități minime, să falsifice complet rezultatul interpretării; 2) să nu reacționeze chimic cu roca sau cu fluidele din ea, în care caz lipsa lui din carotă ar putea fi considerată, neîntemeiat, ca o absență a fenomenului de infiltrare din noroi; 3) să nu altereze structura rocii, elementele, conținutul ei sau proprietățile ei de curgere (dimensiunile canalelor de pori, forma lor sau proprietățile molecular-superficiale ale lor); 4) să nu fie adsorbit de elementele minerale ale rocii sau, mai ales, de ale noroiului, a căror suprafață este foarte mare; 5) să nu compromită cerințele de calitate impuse noroiului de sapă, mai ales în ce privește filtrația și stabilitatea; 6) să fie ușor de dozat în cantități cît mai mici, prin procedee de analiză cît mai rapidă și fără a necesita o aparatură specială, chiar în prezența electroliților care se găsesc normal în compoziția noroiului sau a reactivilor cu care este tratat de obicei.

În acest scop, a fost încercat acidul arsenios (ca anhidridă), dar la utilizare s-a dovedit că acest acid este ușor adsorbit atît de noroi cît și de rocă, în care nu pătrundea, practic, peste 20 mm. Sărurile de litiu încercate în același scop au prezentat același dezavantaj, în afară de probabilitatea ca litiul să fie prezentat în unele roci-magazin sau în apele lor. Sărurile de amoniu, ușor de dozat, stabile și neagresive, se găsesc totuși, uneori, în mod natural în unele ape de nisipuri petrolifere. S-a dovedit că fenomenul este un bun indicator, stabil, ușor de dozat (metoda Koppeschaar), neadsorbit de noroi sau de rocă. Fenolul prezintă însă dezavantajul că necesită concentrații relativ mari (circa 30—40 mg/l), este solubil în țîței și exercită o acțiune negativă asupra noroiului pe care îl face să fie ușor contaminat cu gaze.

Pînă astăzi, reactivul indicator cel mai potrivit este glucoza tehnică. Relativ ieftină, stabilă, neadsorbită și neagresivă, ea prezintă un singur dezavantaj: fermentabilitatea ei, care

poate fi însă împiedicată ușor prin adăugarea în noroi, a circa 0,05 % alcool octilic (2 etil-hexanol). Concentrația obișnuită a glucozei în apa de noroi este de ordinul 5 mg/l.

Folosirea indicatorilor implică luarea unor precauții indispensabile, pentru a nu reduce la zero valoarea indicațiilor obținute: 1) concentrația uniformă a noroiului în indicator trebuie realizată în mod riguros, printr-o circulație adecvată, înainte de începerea carotajului, circa două circuite după o prealabilă uniformizare a concentrației în bataluri; 2) concentrația trebuie verificată, prin analiză, înainte de începerea carotajului, în cursul carotajului și după terminarea lui; 3) dacă situația tehnică a sondei necesită o tratare a noroiului în cursul carotajului, dozajele de indicator se vor face mult mai des, urmînd să se examineze ulterior dacă materialul informativ astfel recoltat este utilizabil. Precauțiunile obișnuite la ambalarea carotelor vor fi respectate în mod scrupulos pentru a se evita orice pierdere de apă din carotă, prin evaporare. Determinarea conținutului total în apă liberă al carotei nu se va face prin metoda de distilare în retortă (apă de cristalizare!), ci prin metoda antrenării prin solvent. Determinarea cantității de glucoză conținută de rocă se va face prin agitarea intensă a rocii fin fărîmate, cu o cantitate suficient de mare de apă distilată (cel puțin un centimetru cub de apă distilată pentru un gram de rocă), urmată de sedimentare.

Cu toată precizia relativ mare obținută la folosirea glucozei, erorile inerente oricărei analize practicate asupra unui proces tehnologic pe scară industrială, cum și lipsa de informații asupra naturii fluidelor dezlocuite de noroiul infiltrat, fac ca folosirea de noroaie cu filtrație cit mai redusă să rămînă un deziderat acut, chiar în cazul folosirii indicatorilor.

Folosirea glucozei rafinate, a dat, în general, rezultate mai precise decît rezultatele obținute cu glucoza tehnică.

Folosirea melasei — mult mai ieftină — și dozarea ei rapidă pe cale polarimetrică, nu sînt încă suficient puse la punct.

În cazul folosirii țiteiului, în loc de noroi de sapă, pentru deschiderea stratelor productive deosebit de sensibile la acțiunea apei infiltrate, problema determinării saturațiilor actuale rămîne complet nerezolvată, deoarece nici filtrația nu este împiedicată, nici nu s-au pus la punct procedee pentru aprecierea ei prin indicatori, iar alterarea valorii S_f este și mai probabilă (în cazul forajului cu noroi cu bază

de apă, S_f este redus, iar în cazul forajului cu țitei, S_f este aparent sporit).

Analizele obișnuite de carote recoltate fără a se folosi indicatori prezintă o utilitate discutabilă, deoarece au numai o valoare indicativă. Din cauza efectului de alterare prin contaminarea cu filtrat din noroi, valoarea dată de analizele de saturație (4) ale carotelor extrase obișnuit, exprimă o valoare a saturației în apă mai mare decît cea reală, indicînd astfel limita maximă a ei în cazul extragerii sub presiune; în acest caz particular, ca și în cazul general, din aceleași motive, cum și din cauza efectului de alterare prin pierderile de hidrocarburi prin detentă, saturația în țitei obținută prin analiză reprezintă numai o limită inferioară, în general sensibil depășită de valoarea reală. Ca exemplu, în fig. 14 sînt reprezentate curbe comparative de alterare a saturației în țitei, datorită prezenței noroiului în gaura de sondă, în timpul carotajului (foraj hidrolic și foraj uscat).

Domeniile uzuale de alterare a saturațiilor, între starea de zăcămint și aceea în care ele se prezintă analizei de laborator, sînt indicate în tabela 8.

Efectul de, alterarea saturațiilor prin decompresia carotei în cursul ascensiunii ei este și mai greu de corectat. Se cunosc cazuri de nisipuri cu productivitatea verificată, care din

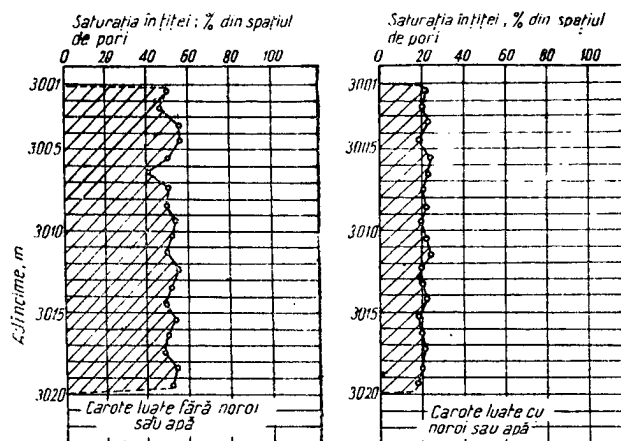


Fig. 14. Alterarea saturației în țitei a carotelor infiltrației noroiului. Curbe de saturație în țitei, în funcție de adâncime, la același strat productiv: a — carote tăiate fără fluid de săpare cu bază de apă; b — carote tăiate cu fluid de săpare cu bază de apă.

cauza acestui fenomen, prezintă aparent la examenul vizual un aspect de totală sterilitate și numai reacția de culoare (v. cap. III. B. b. 4 a) 2), sau fluorescența (v. cap. III. B. b. 4. a) 3),) rămîn pozitive.

Pentru corectarea acestui efect, mai ales în cazul stratelor cu hidrocarburi cu greutate moleculară mică, cu gaze sărace, bogate sau condensat, analiza continuă a conținutului de gaze în noroiul de sapă este foarte utilă, deoarece,

CARACTERISTICILE ROCILOR-MAGAZIN ȘI ALE ROCILOR ÎNVECINATE

147

Tabela 8. Alterarea saturației carotelor în timpul carotajului și extragerii carotelor

Carotat cu noroi cu baza de apă

	În prezența fenomenului de infiltrație, în %			În absența fenomenului de infiltrație, în %		
	S_f	S_a	Apă legată	S_f	S_a	Apă legată
Saturații inițiale	65	35	35	65	35	35
Saturații « în carotieră la fund »	25-30	70-75	25-30	65	35	35
Saturații la la suprafață	15-25	45-50	20-30	30-35	35	35

Carotat cu noroi cu bază de produse petroliere

	În prezența fenomenului de infiltrație, în %			În absența fenomenului de infiltrație, în %		
	S_f	S_a	Țiței legat	S_f	S_a	Țiței legat
Saturații inițiale	65	35	65	65	35	65
Saturații « în carotieră la fund »	65	35	10-40	65	35	65
Saturații la suprafață	35-45	35	8-25	30-35	35	30-35

fără a permite calculul saturațiilor în hidrocarburi, dă indicații semicantitative asupra conținutului în hidrocarburi.

Tot pentru înlăturarea acestui efect, în special, în cazul saturațiilor inițiale și actuale cînd presiunea de zăcămint este încă mare, s-a încercat recoltarea carotelor în carotiere speciale, sub presiune, urmată de aducerea lor sub presiune pînă la gura sondei, colectarea în condiții speciale, prin deplasare cu mercur a fluidelor înlăturate din rocă prin decompresie și analiza lor. Chiar în acest caz, nu se pot colecta decît hidrocarburile gazoase și lichide dar apa expulzată din porii carotei, prin detenta gazelor, este colectată împreună cu resturile turtei de noroi, ceea ce îi anulează orice valoare cantitativă. (În cazul carotajului cu țitei sau cu noroi negru, s-ar colecta apa, dar s-ar pierde hidrocarburile, ceea ce ar fi în general, mai grav și de aceea acest procedeu, nu se practică de obicei; procesul prezintă o oarecare importanță teoretică, în cazul sondelor de injecție în zona acviferă a zăcămintului). Afară de aceste inconveniente, carotiera specială de recoltat probe sub presiune este un aparat delicat, costisitor, greu de manevrat corect și, pînă astăzi, cu funcționare nesigură.

a) *Determinări calitative ale saturației în țitei.* Asupra carotelor și, mai ales, asupra detritusului evacuat cu noroiul, se efectuează deseori probe calitative a saturației în țitei.

1) *Proba colorimetrică.* Se triturează un fragment de probă într-o eprubetă împreună cu o cantitate de solvent, suficient pentru a asigura o decantare ușoară (eventual intensificată prin centrifugare) și se examinează prin transparență pe un fond alb (hîrtie albă sau geam mat), la lumina zilei, o gro-

sime cît mai mare de strat de solvent clarificat.

O colorare în gălbui-brun a solventului indică prezența hidrocarburilor. Procedeu este foarte expeditiv, are o sensibilitate redusă, poate fi practicat la sondă și nu necesită decît rezerva de solvent conservat atent și o eprubetă curată. Pentru sporirea sensibilității se recurge la reducerea cantității de solvent, la separarea prin centrifugare, la compararea culorii solventului folosit cu culoarea aceluiași solvent nefolosit (proba martor) într-un colorimetru clasic, la sporirea grosimii stratului de solvent examinat etc., artificii prin care sensibilitatea probei poate fi împinsă ușor pînă la saturații lipsite de valoare economică (cu excepția zăcămintelor de condensat retrograd, v. cap. V). O rafinare îngrijită a solventului (albire cu pămînturi adsorbante, rar H_2SO_4 concentrat etc.), asigură sensibilitatea probei și înlătură rezultatele fals pozitive. Solvenții folosiți sînt: benzina, white spirit, lampant rafinat, CCl_4 ; CS_2 , C_6H_6 , $CHCl_3$, $(C_6H_5)_2O$, C_6H_5 etc. Este în special necesar ca solventul să asigure și dizolvarea produselor oxidate și bituminoase care au o mare putere colorantă. Această condiție este satisfăcută mai ales de solvenții aromatici și cei halogenați.

2) *Proba de fluorescență.* Se examinează un fragment de probă cu suprafața curată (spălată sau, preferabil, spătură proaspătă) la lumina ultra violetă, în lipsă de radiații vizibile. În cazul prezenței de urme de hidrocarburi în probă, aceasta prezintă o fluorescență gălbui, a cărei intensitate depinde de conținutul în hidrocarburi, dar și de natura lor și de vechimea de deschidere la aer a suprafeței examinate. În unele cazuri, proba prezintă o mare sensibilitate, permițînd, mai ales în cazul noroiului sau al fragmentelor de detritus

din noroi, o diferențiere a hidrocarburilor naturale (țiței) de eventualele produse de ungere provenite de la utilajul de săpare (nefluorescente).

Cu toate acestea, metoda este folosită rar din cauza necesității lămpii speciale cu vapori de mercur, a filtrului special de sticlă opacă la radiații vizibile, dar transparentă pentru radiații cu $\lambda < 0,3\mu$, a sursei de curent necesare etc. Modelele recente portabile, cu sursă de curent proprie (baterie uscată), sînt încă puțin răspîndite și nejustificat de scumpe, pentru o analiză incompletă de saturație, cum este cea calitativă; ele sînt indicate în special, pentru cartări geologice-petrografice.

3. Determinarea indirectă a saturației în apă sărată cu ajutorul datelor de carotaj electric. Determinarea saturației S_a cu ajutorul datelor de rezistivitate electrică, teoretic cantitativă, este în practică numai indicativă, din cauza necunoașterii exacte a celorlalte mărimi care intră în ecuația de legătură. Dacă rezistivitatea electrică a mineralelor rocii și a hidrocarburilor care îi saturează parțial porii este foarte mare în comparație cu rezistivitatea electrică efectivă a rocii parțial saturată cu apă sărată, R , și cu rezistivitatea electrică a apei sărate din rocă, R_a , saturația

$$S_a \approx \sqrt{\frac{R_a}{m^x \cdot R}} \quad (20)$$

unde

m este porozitatea rocii;
 x — un exponent între 1,3 și 2,0, depinzînd de structura rocii și de forma canalelor de pori.

Pentru rocile slab cimentate, se poate lua $1,3 < x < 1,6$ iar pentru gresile mai bine cimentate, $1,6 < x < 2,0$. Cu toate că nu se cunoaște exact rezistivitatea reală (carotajul electric dă numai o valoare aparentă care trebuie corectată cu atenție, v. vol. I) structura relației care definește pe S_a este astfel constituită, încît o eroare de $\pm 40\%$ asupra uneia dintre rezistivități, în cazul unei porozități de circa 25%, dă o eroare de numai $\sim 10\%$ asupra saturației în hidrocarburi ($S_g + S_e = 1 - S_a$), valoare care interesează din punct de vedere economic.

Această relație însă este folosită de obicei în sens invers: cunoscîndu-se rezistivitățile

R și R_a , cum și saturația S_a , se determină porozitatea:

$$m^{-x} = \frac{S_a^2 R}{R_a} \quad (21)$$

Pentru rezolvarea grafică a acestei ecuații, se poate folosi nomograma reprezentată în fig. 15, a și b. (v. și metoda indicată la Cap. III. B. b. 9. a) 8)).

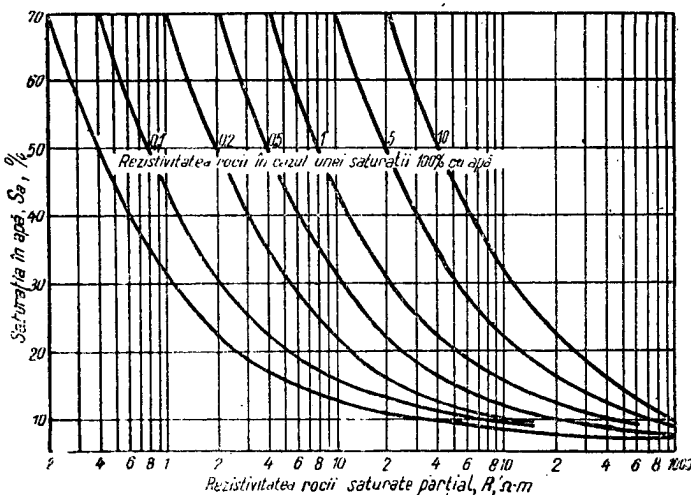
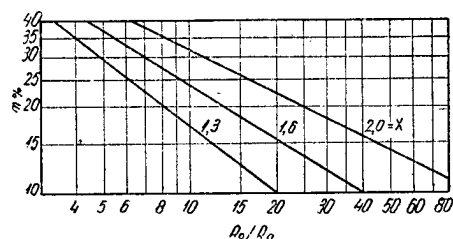


Fig. 15. Diagrama pentru determinarea porozității în funcție de saturație și de rezistivitate:

a — reprezentarea funcției $m^{-x} = \frac{R_0}{R_a}$ unde R_0 este rezistivitatea aceleiași rocii,

în cazul $S_a = 1$; b — reprezentarea funcției $R_0 = R S_a^2$.

În privința rezistivității apelor sărate de zăcămint, v. cap. IV. B, a. 8. c și cap. III. B. b. 6. Rezistivitatea apelor sărate conținute în apele straturilor productive este cuprinsă practic, între 0,04 și 200 ohmi·metri.

În practică însă, folosirea ecuației (21) și a diagramei din fig. 15 sînt foarte îngreuiate din cauza neuniformității saturației în jurul găurii de sondă. Faptul că zona imediat învecinată cu gaura de sondă are o saturație S_a mai mare decît aceea a restului stratului și că rezistivitatea acestei apei, de obicei mult mai puțin

sărate, este mai mare decât a apei de strat, îngreuiază mult determinarea rezistivității R fie în zona vecină sondei, fie în zona de strat necontaminată și cu atât mai mult, determinarea saturației S_a în oricare din aceste regiuni. Mai mult încă, nici ipoteza că R este mai mare în vecinătatea găurii de sondă decât în restul stratului nu este adevărată decât dacă apa infiltrată din noroi în strat a dezlocuit o apă sărată. Dacă ea a dezlocuit însă hidrocarburi, atunci R este mai mică în vecinătatea găurii de sondă decât în strat. Corectarea rezistivității R a rocilor, în funcție de grosimea stratului, de rezistivitatea aparentă relativă (a stratului față de noroiul din sondă și față de aceea a straturilor vecine), de distanța dintre electrozi, de succesiunea acestora și de poziția lor față de stratul cercetat, complică încă și mai mult problema și reduce întrucâtva precizia probabilă a determinărilor de saturație pe această cale (v. și vol. I).

b) *Determinări directe cantitative ale saturațiilor în apă, în țiței și în gaze prin metode de laborator.* Pentru determinarea saturațiilor în țiței și în apă ale carotelor, se folosesc două metode (cu diferite variante fiecare): 1) metoda distilării directe și 2) metoda extracției cu solvenți propriu-zis, în faza lichidă, respectiv metoda antrenării cu vapori de solvent și 3) metoda distilării și a antrenării cu aer cald.

Metoda 1) prezintă avantajul că nu introduce în probă fluide străine sau fluidele extrase din ea și, deci, permite determinarea citorva caracteristici fizico-chimice ale acestora (principal).

Instalația cuprinde: un furnal refractar și termoizolant 3, o retortă 1 cu capac cu clemă și cu șurub 2, un încălzitor electric sau cu gaze 4 un tub de descărcare 5, o eprubetă gradată 6 pentru colectarea fracțiunilor lichide, răcită de mantaua cu circulație de apă 7, un refrigerent pentru condensare 8, un tub 9 pentru conducerea fracțiunilor necondensate la un flacon gazometru 10, un tub 12 de descărcare a acestuia în cilindru gradat 13 pentru colectarea și pentru măsurarea apei dezlocuite. Poziția cilindrului 13 poate fi reglată cu ajutorul unui dispozitiv care nu a fost reprezentat în fig. 16, astfel încât nivelul apei în vasele 10 și 13 să aibă aceeași înălțime pentru a se realiza măsura la presiunea atmosferică a volumului de gaz colectat în vasul 10 prin deplasarea apei în cilindrul 13.

Metoda de lucru constă în următoarea succesiune de operații:

După prepararea (cap. III C. d.) și după cântărire, proba se introduce într-o retortă metalică confecționată altădată din fontă, astăzi din aliaje inoxidabile, până la temperatura de 600 °C. Se încălzește treptat retorta cu ajutorul furnalului încălzit cu un bec de gaz Mecker sau, de preferat, cu un încălzitor electric, fig. 16, până la temperatura de 180°—200°C. Prin aceasta se înlătură toată apa în stare

lichidă din porii probei, o parte relativ mică din apa de cristalizare a unora dintre mine-ralele probei, cum și o parte din apa adsorbită de acestea. Se întregistrează în cursul acestei faze evoluția temperaturii în retortă și la ieși-

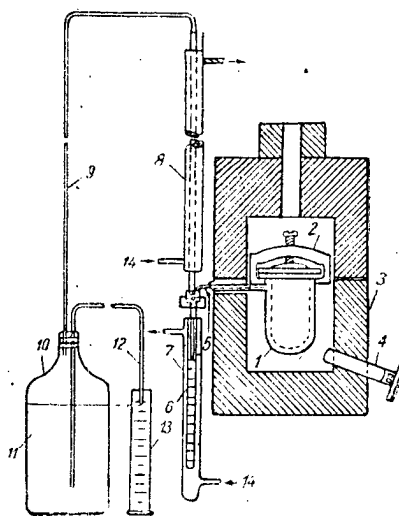


Fig. 16. Instalația de determinare a saturațiilor prin distilare directă în retortă:

1 — retortă; 2 — clemă capacului retortei; 3 — înveliș izolat și refractar; 4 — arzător Mecker; 5 — tub de evacuare a retortei; 6 — cilindru gradat colector; 7 — refrigerent; 8 — refrigerent; 9 — tub de descărcare a fracțiunilor necondensate; 10 — flacon de colectare a fracțiunilor necondensate; 11 — apă; 12 — sifon pentru descărcarea apei dezlocuite de fracțiunile necondensate; 13 — cilindru gradat pentru măsurarea apei dezlocuite de fracțiunile necondensate; 14 — intrarea apei de răcire.

rea din refrigerent a lichidului condensat, în funcție de timp și de cantitățile de apă, de hidrocarburi lichide și de gazele degajate. Durata minimă a acestei faze este de 40 minute, iar viteza de încălzire pe intervalul 20°—120° nu trebuie să depășească 4°/min. Se recomandă folosirea unor viteze mult mai mici. După terminarea acestei faze, se încălzește mai departe treptat retorta, până la 550°—600°, temperatură la care proba trebuie să rămână circa 20 minute. În această a doua fază, distilează o parte din fracțiunile grele, crachează și chiar pirolizează celelalte hidrocarburi din probă, iar apa rămasă încă în probă în faza I este și ea vaporizată (restul apei adsorbite și de cristalizare).

Operația poate fi efectuată mai repede, în cazul cînd se face determinarea asupra unei probe alcătuite din fragmente mai mici. În acest caz, se recomandă folosirea unei cantități mai mari de probă, 150—200 g rocă, fără ca prin aceasta să se poată compensa erorile introduse prin suprafața mai mare de probă, parțial alterată. Volumele de material colectate sint exprimate ca fracțiune din volumul de pori al probei. Ele trebuie corectate pentru următoarele efecte: α) pierderi de gaze prin di-

zolvarea în apa din vasul (α); β) pierderi de hidrocarburi prin piroliză și prin transformare în cocs, care rămâne în porii probei; γ) exces de gaze rezultat din cracarea și din piroliza hidrocarburilor grele neevaporizate în prima fază; δ) pierderi de apă prin necondensarea în refrigerent și prin antrenarea ei în stare de vapori în gaze, al căror volum este din această cauză sporit și urmează să fie corectat și pentru acest efect; ϵ) surplus de apă rezultată din apa adsorbită de elementele minerale ale rocii (în deosebi la probele cu granulometrie foarte fină); ι) surplus de apă rezultată din pierderea apei de cristalizare a unora dintre elementele minerale ale probei; κ) surplus de gaze și pierdere de greutate a probei prin disocierea termică a carbonaților din probă.

Efectele (β , δ) și (ι , κ) se produc totdeauna acționând în sens contrar asupra greutății probei de rocă după distilare, astfel încât, în cazul determinărilor de precizie mai redusă, ele se neglijează, considerând că se compensează. În cazul probelor curențe (fără un conținut exagerat de sulfați care pierd treptat apa de cristalizare și fără un conținut exagerat de carbonați care dau pierderi de greutate prin anhidrida carbonică de disociere termică), pierderea de greutate a probei datorită ambelor efecte este, în general, de ordinul a 1%.

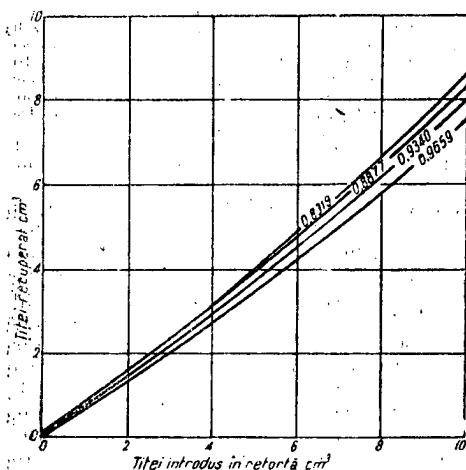


Fig. 17. Diagramă de corecție pentru deficitul de recuperare în fracțiuni lichide, datorită cracării și pirolizei pentru țiteiuri cu următoarele densități: 0,832; 0,888; 0,934 și 0,960.

Carbonul depus în pori reprezintă de obicei mai puțin decât 10 % din volumul țiteiului și trebuie ținut în seamă atât la o eventuală determinare de porozitate asupra aceleiași probe (ceea ce nu este recomandat decât în cazul extrem al lipsei de probă suplimentară), cât și, mai ales, la determinarea saturației în hidrocarburi. Pentru corectarea acestui efect, se recomandă efectuarea de probe oarbe, de calibrare a retortei, prin introducerea în

retortă, a unor cantități exact măsurate de țitei, de apă și de nisip de probă, de aceeași natură ca cele din roca de examinat, urmată de o determinare completă. Pentru roci sedimentare obișnuite, gresii și nisipuri cu conținut silicios predominant, fără conținut exagerat de material argilos sau carbonatic, se poate folosi în prima aproximație diagrama de corecție prezentată în fig. 17.

Coefficientul de recuperare variază între 0,70 și 0,90, fiind mai mic la țiteiurile grele, care au un conținut mai mare de hidrocarburi cracabile și pirolizabile.

Cantitatea de apă degajată din cea de cristalizare, mică în comparație cu greutatea probei inițiale, capătă importanță când este comparată cu volumul porilor. În cazul rocilor cu porozitate mică, acest efect poate lua o amploare considerabilă (peste 20–30 % din S_a) dar, în general, rămâne sub 5–6 % S_a . Experiența a arătat că compoziția naturală a rocilor sedimentare are o variație laterală destul de mică, din acest punct de vedere, spre a se putea face probe oarbe speciale pentru determinarea acestui efect numai în circa 10 % din probele examinate, iar folosirea acestor rezultate pentru corecția celorlalte 90 % asigură o determinare a saturației în apă cu o eroare mai mică decât 1%.

Din cauza complicației aparaturii și a operațiilor, din cauza multiplicității surselor de erori, a probelor de control necesare pentru corecție și a rezultatelor nesatisfăcătoare cantitativ și calitativ, metoda este în general părăsită în U.R.S.S. și în țările europene. Speranța de a putea determina unele proprietăți fizico-chimice ale hidrocarburilor colectate nu se realizează în general, deoarece natura acestora se deosebește de a celor din proba inițială, din cauza pierderilor selective de cracare-piroliză.

Greutatea specifică a țiteiului, necesară pentru completarea analizei se determină fie asupra unor probe de țitei extras prin sonde mai mult sau mai puțin vecine, de la același strat, fie prin măsurare directă asupra țiteiului extras, prin distilarea lui în retorte. În primul caz trebuie să se aibă în vedere variația în zăcămintă a compoziției fazei de hidrocarburi lichide: 1) prin recoltarea de probe din sonde cât mai apropiate; 2) prin recoltarea de probe din sonde situate pe cât posibil pe aceeași izobată; 3) prin corectare pe cale teoretică, ținând seamă de gradientul termodinamic de concentrație gravitațională a diferitelor hidrocarburi pe verticală, procedeu delicat și greu de aplicat. În al doilea caz, este necesară corectarea importante variații de densitate din cauza distilării, fie prin probe martor, în cazul când se dispune de țitei cu o compoziție apropiată de aceea a țiteiului examinat (despre această apropiere nu se pot avea decât indicații probabile, prin compararea produselor rezultate din distilare în retortă și nu indicații exacte, prin

compararea produselor supuse distilării, cum ar trebui), fie prin corectare empirică (în primă aproximație) conform diagramei reprezentată în fig. 18.

Determinarea greutateii specifice asupra unor cantități foarte reduse la lichidul extras prin

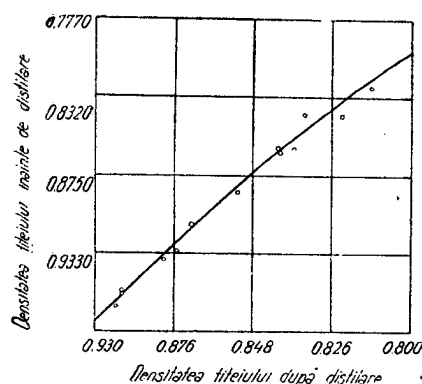


Fig. 18. Diagramă pentru determinarea greutateii specifice a țiteiului supus distilării în retortă, în funcție de greutatea specifică inițială.

distilare, se face cu ajutorul unui semimicro-picnometru (fig. 19) de construcție specială, cu capacitatea de 2 cm³.

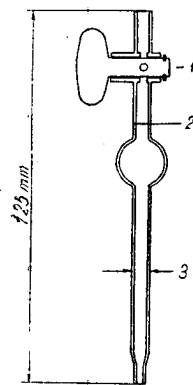


Fig. 19. Micro-picnometru pentru determinarea greutateii specifice a hidrocarburilor lichide rezultate la distilarea în retortă: 1—robinet cu orificiu capilar; 2—reper determinând între el și vîrf o capacitate de 2,0 cm³; 3—pipeta picnometruului.

Se recomandă efectuarea de probe prealabile cu țiteuri cu densitate cunoscută, din cauza diversității condițiilor de fabricație a hirtiei de filtru și influenței viscozității.

Metoda 2) cuprinde, sub varianta cea mai răspîndită, două faze:

Faza I de antrenare a fracțiunilor de hidrocarburi ușoare și a apei din probă, cu vaporii unui solvent mai puțin volatil decît apa, urmată de o extracție cu solvent regenerat în circuit închis, cu un solvent mai volatil și cu o putere de dizolvare mult mai mare decît aceea a pri-

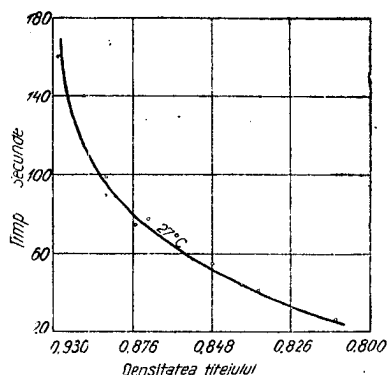


Fig. 20. Diagramă pentru determinarea aproximativă a greutateii specifice a țiteiului pe baza timpului ascensiunii capilare într-o fișie de hirtie de filtru, la 15 mm deasupra nivelului de echilibru, la temperatura de + 27°C. În abscisă, greutatea specifică, în ordonată, timpul de ascensiune.

mului solvent, pentru fracțiunile cu pondere moleculară mare, cu structură complexă (produse de oxidare parțială, compuși asfaltici, carbene etc.) sau chiar complet insolubile în termenii cu mică pondere moleculară ai seriei parafinice.

Pentru faza I se folosesc ca solvenți: a) unele benzine de extracție special preparate (U.R.S.S.) cu punctul de fierbere de circa 120°; b) un white-spirit cu punctul de fierbere mediu de circa 160° (laboratorul Cîmpina); c) toluen tehnic cu punctul de fierbere (90 %) de 120°; d) bromoform cu punctul de fierbere de circa 151° și e) tetraclorețan cu punctul de fierbere de circa 146°.

Faza II de solvire și de spălare a fracțiunilor grele din țiteiul probei, cu ajutorul unui solvent volatil. În această fază se folosesc: a) benzen cu punctul de fierbere de 80°; b) amestec de alcool etilic + benzol, cu punctul de fierbere de 78°; c) cloroform cu punctul de fierbere de circa 61,2°; d) sulfură de carbon cu punctul de fierbere de circa 46° și e) piridină cu punctul de fierbere de circa 116°. Ultimii doi solvenți sînt folosiți numai în mod excepțional, în cazul prezenței în probă a unor carbene sau a unor carboizi insolubili în solvenții obișnuiți. S-a mai preconizat, fără succes deosebit folosirea consecutivă a trei solvenți și anume: I benzen, II acetonă și III pentan (punctul de fierbere de 36°).

În funcție de necesități și de disponibilități, oricare dintre acești solvenți poate fi folosit, dar în unele cazuri este nevoie să se folosească solvenți speciali. Pentru faza II,

în care puterea de solvire este foarte necesară, se preferă în majoritatea cazurilor, benzenul, care realizează o extracție practic totală pentru toate țițeiurile obișnuite. Cloroformul, superior benzenului ca putere de solvire, rezolvă cazurile mai dificile, însă prezintă riscul (ca și tetraclorura de carbon) de a da naștere prin contact accidental cu apa la temperaturi înalte, la vapori de fosgen foarte toxici și cu atât mai periculoși, cu cât au efect foarte insidios.

Practic fără miros (miros slab de fin), după circa 5—7 ore de la inspirare, el dă naștere la un intens oedem pulmonar, efectul fiind cu atât mai intens se pare, cu cât intoxicatul a făcut eforturi fizice mai mari după inhalare. În caz de accident, adică de răspindire de cloroform pe suprafețe libere calde, se va aerisi imediat camera, persoanele care au inhalat vapori vor sta în repaus cât mai complet timp de câteva ore și vor avea la îndemână perle de eter pentru a le ingera, în cazul când s-ar ivi turburări respiratorii.

Dintre solventii uzuali, cei care pot fi folosiți în aceste cazuri sînt următorii:

Acetona: densitate $d_4^{20} = 0,791$; indice de refracție $n_D = 1,359$; căldura latentă de vaporizare la presiunea atmosferică, $\lambda = 120$ kcal/kg; punct de inflamabilitate $i = -20^\circ$; punct de fierbere la presiunea atmosferică, $T_f = 56^\circ - 58^\circ$.

Alcoolul metilic: $d_{15}^{15} = 0,7965$; $n_D = 1,3305$; $\lambda = 267$ kcal/kg; $i = \text{circa} + 8^\circ$, $T_f = 66^\circ$.

Alcoolul etilic (abs.): $d_{15}^{15} = 0,7943$; $n_D = 1,3623$; $\lambda = 205$ kcal/kg; $i = \text{circa} + 12^\circ$; $T_f = 78,2^\circ$.

Alcoolul amilic (tehnice): $d_{15}^{15} = 0,80 - 0,83$; $n_D = 1,40 - 1,42$; $i = \text{circa} + 45^\circ$; $T_f = \text{între } 100^\circ \text{ și } 145^\circ$.

Benzenul (pur): $d_{15}^{15} = 0,8736$; $n_D = 1,5014$; $\lambda = 93$ kcal/kg; $i = -8^\circ$; $T_f = 80,2^\circ$.

Benzenul solvent industrial, I: $d_{15}^{15} = 0,87 - 0,88$; $n_D \approx 1,95$; $T_f = \text{nimic sub } 120^\circ$, cel puțin 90 % până la 160° , $i \approx 22^\circ - 28^\circ$.

Benzenul solvent industrial, II: $d_{15}^{15} = 0,88 - 0,91$; $n_D \approx 1,50$; $T_f = \text{nimic sub } 136^\circ$, cel puțin 90 % până la 180° ; $i \approx 25^\circ - 32^\circ$.

Benzenul tehnic *de 90%*: $d_{15}^{15} = 0,880 - 0,883$; $n_D \approx 1,50$; $i = -8^\circ$, fierbe 90 % înainte de 100° .

Benzenul tehnic *de 50%*: $d_{15}^{15} = 0,875 - 0,877$; $n_D \approx 1,50$; $i = -6^\circ$, fierbe 50 % înainte de 100° .

Benzenul tehnic *de zero*: $d_{15}^{15} = 0,870 - 0,882$; $n_D \approx 1,50$; $i \approx 0^\circ$, fierbe 0 % până la 100° , 90 % până la 120° .

Benzenul tehnic *frunte*: $d_{15}^{15} \approx 0,860$; $n_D \approx 1,49$; $i \approx -12^\circ$; fierbe cel puțin 60 % înainte de 79° .

Benzina grea: $d_{15}^{15} = 0,700 - 0,750$; $n_D = 1,40$; $i = 0^\circ \dots + 15^\circ$; fierbe 90 % înainte de 100° , 99 % înainte de 150° .

Clorura de metilen (metan diclorat) $d_{15}^{15} = 1,328$ (tehnice 1,370—1,375); $n_D = 1,43$; $\lambda = 41$ kcal/kg; neinflamabilă; $T_f = 40^\circ - 42^\circ$.

Cloroformul (Metan trichlorat) (tehnice): $d_{15}^{15} = 1,488$; $n_D = 1,446 - 1,447$; $\lambda = 58$ kcal/kg; neinflamabil, $T_f = 61^\circ - 62^\circ$.

Clorura de carbon (Tetra) (Metanul tetraclorat), v. Tetraclorura de carbon.

Clorotoluenul (mono): $d_{15}^{15} = 1,07 - 1,08$; $n_D = 1,52$; $T_f = 155^\circ - 165^\circ$.

Decalina (Decahidronaftalina): $d_{15}^{15} \approx 0,900$; $n_D = 1,475$; $i \approx 60^\circ$; $T_f = 185^\circ - 195^\circ$.

Dioxanul (Dioxidictanul): $d_{15}^{15} = 1,157$; $n_D = 1,385$; $i = + 5^\circ$. $T_f = 101^\circ$ pur; $90^\circ - 110^\circ$ (tehnice).

Etilmetilcetona: $d_{15}^{15} = 0,810$; $n_D \approx 1,380$; $i \approx - 14^\circ$; $T_f = 81^\circ$ (pură); $75^\circ - 85^\circ$ (tehnice).

Eterul etilic: $d_{15}^{15} = 0,720 - 0,728$; $n_D = 1,3535$; $T_f = 35^\circ - 36^\circ$; $i = - 40^\circ$.

Etilglicolul: $d_{15}^{15} = 0,932$; $n_D = 1,406$; $T_f = 128^\circ - 136^\circ$; $i = + 40^\circ$.

Ligroina (White-spirir): $d_{15}^{15} = 0,76 - 0,81$; $n_D = 1,42 - 1,44$; $i \approx 21^\circ$; fierbere: $\approx 5\%$ până la 125° ; 90% până la 200° ; 97% până la 220° .

Monoclorbenzenul: $d_{15}^{15} = 1,105$; $n_D = 1,526$; $T_f = 132^\circ$; $i \approx 28^\circ$.

Metilglicolul: $d_{15}^{15} = 0,967$; $n_D = 1,403$; $T_f = 126^\circ - 128^\circ$; $i = 36^\circ$.

Pentaclorețanul: $d_{15}^{15} \approx 1,470$; $n_D = 1,443$; $T_f = 55^\circ$; $i = 17^\circ$.

Piridina: $d_{15}^{15} = 0,981$; $T_f = 116^\circ$; $i = 29^\circ$.

Sulfura de carbon: $d_{15}^{15} = 1,263$; $n_D = 1,620$; $T_f = 46^\circ$; $i = - 12^\circ$.

Triclorețilena: $d_{15}^{15} \approx 1,470$; $n_D = 1,481$; $T_f \approx 86^\circ$.

Tetraclorețanul: $d_{15}^{15} = 1,60$; $n_D = 1,502$; $T_f = 144^\circ - 145^\circ$.

Tetraclorura de carbon: $d_{15}^{15} = 1,594$; $n_D = 1,462$; $T_f = 76^\circ - 77^\circ$.

Toluenul (pur): $d_{15}^{15} = 0,870 - 0,871$; $n_D = 1,496$; $T_f = 110^\circ - 111^\circ$; $i = + 5^\circ$.

Toluenul (tehnice): $d_{15}^{15} = 0,871$; $n_D \approx 1,500$; $T_f = \text{minimum } 90\%$ între 100° și 120° ; $i = + 5^\circ$.

Xilenul: $d_{15}^{15} = 0,867 - 0,869$; $n_D = 1,496$; $T_f = 100\%$ între $136^\circ - 140^\circ$; $i = + 21^\circ$.

Operațiile din faza I se efectuează astfel: se introduce proba (20—25 g cîntărită cu o eroare mai mică decît 0,01 g) într-un cartuș cilindric de hîrtie de filtru, deschis la partea superioară și apoi cu totul, în gîtul balonului D.S. (fig. 21).

Se introduc în balonul de 500—750 cm³, circa 200—250 cm³ solvent, se assemblează aparatul în modul arătat în fig. 21 și se încălzește treptat. Aparatul este compus din: balonul DS, cu gît gros (fig. 21) cu capacitatea de 500 cm³, fiola de colectare avînd forma din fig. 21, adaptată cu dop șlefuit la balonul DS și la refrigerentul superior, cu circulație de apă la $+ 10^\circ \dots + 20^\circ$. Aparatura este standardizată în U.R.S.S. în OST 7872, dar fiola se execută uneori diferit, cu tubul suplimentar reprezentat punctat în fig. 21, care asigură o scurgere mai liniștită a preaplinului de solvent condensat, care nu mai circulă în contracurent prin același tub cu vaporii de solvent.

Încălzirea este continuată, solventul fierbe, vaporii lui încălzesc continuu proba pînă la temperatura lor (peste 100°), antrenînd vaporii

de apă cu care intră în fiolă și în refrigerent, unde condensează.

Condensatul separă gravitațional apa la partea inferioară a fiolei, unde volumul poate fi citit. Excesul de solvent condensat se scurge din nou în balon, pe lângă pereții cartușului.

Trebuie menționat că solventul nu este folosit în acest caz ca solvent, ci ca agent termofor. Încălzirea este continuată circa o oră după ce nivelul apei în fiolă nu mai crește.

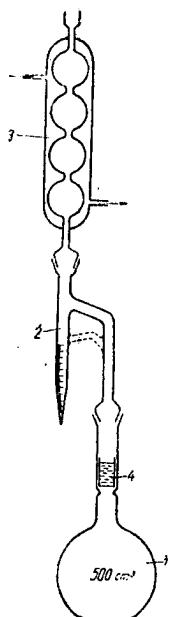


Fig. 21. Aparat de distilare-antrenare a apei și a hidro-carburilor ușoare, D.S.:

1 — balon pentru încălzirea solventului; 2 — fiolă pentru colectarea apei și pentru măsurare; 3 — refrigerent pentru solvenți și materialul antrenat din probă; 4 — cartușul cu probă.

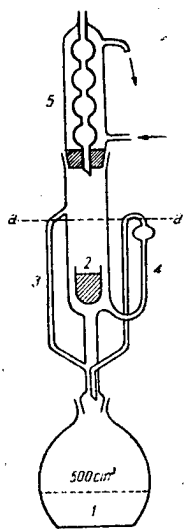


Fig. 22. Extractor Soxhlet pentru extragerea cu solvenți a fracțiunilor grele din probe:

1 — balon pentru încălzirea solventului; 2 — probă; 3 — tub de alimentare cu vapori de solvent; 4 — sifon pentru evacuarea periodică a extractului; 5 — refrigerent; a-a, nivelul de preaplin al solventului în extractor.

(v. și STAS 24-50, Determinarea apei în produse petroliere lichide).

Operațiile din faza II se efectuează în felul următor:

Proba, care din punctul de vedere al greutății este echivalentă cu o probă «nou tăiată», se introduce într-un extractor de tip Soxhlet, cu capacitate corespunzătoare (fig. 22), într-un cartuș de hirtie de filtru. Se adaptează extractorului propriu-zis: la partea inferioară, un balon încărcat cu 250—300 cm³ solvent (benzen), în cantitate suficientă pentru a umple extractorul peste nivelul a-a, iar la partea superioară, un refrigerent cu capacitatea de răcire superioară capacității de încălzire a aparatului folosit pentru încălzirea balonului (de

obicei încălzitor electric cu rezistență protejată).

Solventul condensat în răcitor, practic pur (liber de fracțiunile grele neantrenate odată cu apa în faza anterioară), pică peste probă, o spală și se acumulează în extractor, pînă cînd la atingerea nivelului a-a, sifonul lui de descărcare se amorsează și ei se descarcă complet.

Prin aceasta se poate urmări cantitatea de solvent proaspăt trecută prin probă, mult mai mare decît cea încărcată în balon și egală cu un multiplu (corespunzător numărului de descărcări ale extractorului efectuate) al capacității extractorului de la fund pînă la nivelul a-a.

După ce solventul iese din probă complet incolor sau exact cu aceeași culoare cu care pică peste probă (2—8 ore), operația poate fi considerată terminată, proba poate fi scoasă cu cartușul, răcită în exsicator și cîntărită.

Pierdere totală de greutate a probei în ambele faze ale operației reprezintă greutatea țiteiului și a apei sărate, minus greutatea sării din apa sărată (care a rămas în probă), plus pierdere de greutate datorită efectelor mecanice de manipulare a probei, în cursul tuturor operațiilor. Pierdere de greutate datorită efectelor mecanice se determină prin mărirea greutății probei între fazele operației, iar greutatea sării rămase în probă se determină prin dozarea clorurilor, ca ClNa, cu NO₃Ag (și CrO₄K ca indicator), în special pentru a corecta porozitatea, a cărei valoare determinată experimental este redusă de sarea prezentă în pori.

Fiind aplicată cu atenție, metoda 2) a dat cele mai bune rezultate obținute pînă în prezent.

O variantă a acestei metode realizînd ambele etape într-un singur aparat, este metoda propusă de prof. Zaks. Într-un aparat asemănător în principiu celui din fig. 21 se tratează în același mod proba cu un solvent care îndeplinește ambele funcțiuni: prin

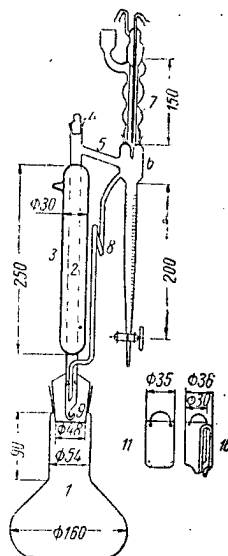


Fig. 22 bis.

1 — balon; 2 — tub de conducere a vaporilor; 3 — înveliș de sticlă antistatică, cu spațiu vidat; 4 — dop de încălzire; 5 — conductă de vapori; 6 — fiolă-biuretă pentru condensat; 7 — refrigerent demontabil; 8 — conductă de preaplin cu închidere hidrolică, pentru condensat; 9 — virf pentru agățarea recipientului 10 sau 11; 10 — recipient cu fund perforat, pentru probă; 11 — recipient cu sifon de descărcare, pentru probă.

punctul de fierbere peste 100° , asigură eliminarea apei și prin capacitatea mare de solvire și separarea probei de solventul lichid încărcat cu produsele extracției, se asigură o extracție practic totală.

Solventul care satisface aceste cerințe este toluenul cu punct final de fierbere $+120^\circ\text{C}$ și cu putere mare de solvire grație structurii aromatice.

Neajunsul esențial al acestor metode, acela de a necesita o durată de ordine a 8 ore în medie a fost ocolit prin construcția aparatului din fig. 22 bis, realizat în laboratoarele Institutului de cercetări pentru petrol din Azerbaidjan. Printr-o reducere la minimum a suprafețelor de pierdere termice, durata operației este redusă la $20'$ până la 2h pentru desaturarea simultană de apă și hidrocarburi cu ajutorul toluenului.

Metoda 3) constă în distilarea și în antrenarea cu aer cald a apei din probă. Proba

După circa $60'$ de circulație cu aer cald sec peste probă, se poate considera că apa din probă a fost complet eliminată. Prin cîntărirea tubului 6, înainte și după, circulație se deduce cantitatea de apă absorbită, provenită numai din probă, aceea din aerul atmosferic folosit fiind în prealabil reținută în 4 și 5.

Această metodă — destul de expeditivă — este utilă numai pentru saturația în apă, urmînd ca saturația în hidrocarburi să fie determinată pe altă cale.

Din cauza posibilității mai reduse de reglare exactă a temperaturii fluidului de antrenare și a erorilor datorite înlăturării în cantitate sensibilă de apă de cristalizare din mineralele care cedează ușor (în special gipsul) prin încălzire peste 120° , metoda are o valoare redusă.

Afară de aceasta, tubul 6 cu MgCl_2 mai absoarbe și unele hidrocarburi, astfel încît și din această cauză conținutul de apă rezultă aparent sporit.

În cazul carotelor extrase din roci gazeifere (zăcămintele fără hidrocarburi peste C_4 și lipsite de gips, metoda are însă o valoare practică recomandabilă.

Încercările de a folosi această metodă și pentru determinarea conținutului de hidrocarburi lichide, prin continuarea într-o a doua fază a circulației de aer încălzit la $400-500^\circ$, se lovesc de dificultățile provocate de cracare, întîlnite și la metoda (1), agravate de prezența fenomenelor de oxidare-asfaltizare care provoacă pierderi mari din conținutul de hidrocarburi.

5. Permeabilitatea rocilor colectoare și învecinate

a) *Generalități. Definiții.* În hidraulica subterană a zăcămintelor de hidrocarburi*), permeabilitatea absolută a unui mediu poros, definită fizic este debitul-volum (cm^3/s) de fluid cu viscozitatea de un centipoise $\left(10^{-2} \cdot \frac{\text{dyn} \times \text{s}}{\text{cm}^2}\right)$

care se scurge prin roca respectivă printr-o secțiune normală de un centimetru pătrat, sub acțiunea unui gradient de presiune de o atmosferă tehnică pe centimetru pătrat; iar

*) Spre deosebire de hidraulica solurilor superficiale, în care permeabilitatea este luată cu dimensiunile $[\text{LT}^{-1}]$ în m/s , de exemplu fiind determinată prin $Q = K_p S$, v. STAS 1620-50.

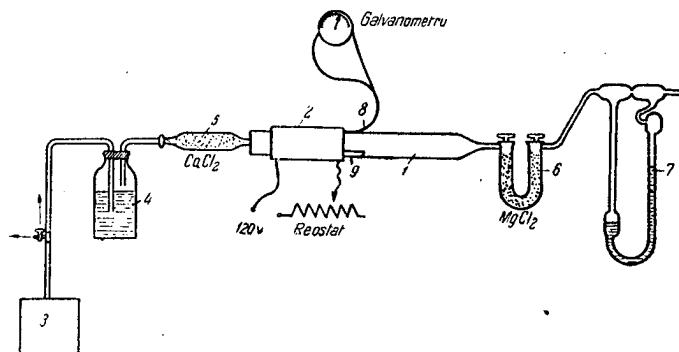


Fig. 23. Aparat pentru eliminarea apei din probe cu curent de aer cald:
1 — tubul pyrex cu nacelă; 2 — manșon încălzitor (electric); 3 — suflantă pentru aer; 4 — vas Drechsel cu H_2SO_4 ; 5 — tub uscător cu CaCl_2 ; 6 — tub uscător cu MgCl_2 ; 7 — reometru; 8 — termocuplu pentru controlul temperaturii; 9 — nacela cu probă.

(circa 5 g) fărîmată sau tăiată, este așezată într-o nacelă de porțelan introdusă într-un tub de sticlă pyrex (1), încălzit la exterior prin efect Joule de un element încălzitor înfășurat pe tub (fig. 23).

Cu ajutorul unei suflante 3, se trimite aer prin borcanul Drechsel cu acid sulfuric 4 și apoi prin tubul în formă de U 5, cu clorură de calciu. În trecerea lui prin tubul de pyrex 1, aerul este încălzit pînă la circa $110^\circ-120^\circ$, ceea ce se controlează cu ajutorul termocuplului 8. În partea subțiată a tubului 1, se pune un dop de vată pentru oprirea picăturilor de hidrocarburi mai grele.

Aerul încărcat cu vaporii de apă din probă este trecut prin tubul în formă de U 6, umplut cu Cl_2Mg , care îl răcește și îl usucă, iar după aceasta, este trecut prin reometrul 7, care determină debitul de aer scurs.

definită analitic este coeficientul k , care, pentru roca respectivă, satisface ecuațiile:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \\ v_y &= -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \\ v_z &= -\frac{k_z}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \right) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

în care:

v_x , v_y și v_z — componentele vitezei de filtrație de pe axele x , y (orizontale), respectiv z (verticală în cm/s;
 μ — viscozitatea dinamică a fluidului, în cP;
 k_x , k_y și k_z — coeficienții de permeabilitate pentru scurgerea după direcția x , y , respectiv z , în cm²;

$\frac{\partial p}{\partial x}$, $\frac{\partial p}{\partial y}$ și $\frac{\partial p}{\partial z}$ — gradientii de presiune după

direcțiile paralele cu axele x , y și z , în atmosfere tehnice pe centimetru;

ρ — masa specifică a fluidului, în g/cm³;

g — accelerația gravitației, în cm/s².

Definiția primă, fizică, determină unitatea practică de permeabilitate absolută, darcy-ul, permeabilitatea unei roci care în condițiile citate lasă să se scurgă un debit-volum de 1 cm³/s.

Definiția a doua, analitică, determină unitatea CGS de permeabilitate absolută: cm². Ambele unități au aceleași dimensiuni: $[k] = [L^2]$.

Ele sînt legate prin relația: 1 cm² = 10⁸ darcy; în practică este folosit adeseori mili-darcy-ul, egal cu 10⁻³ darcy = 10⁻¹¹ cm².

Ambele definiții ale permeabilității absolute se bazează pe următoarele premise:

1) fluidul care se scurge este monofazic și nu reacționează chimic sau fizic cu roca;
 2) scurgerea are loc în regimul laminar sau în regimul viscos, adică există o proporționalitate directă între debit și gradientul de presiune care îl generează (v. Cap. II).

Dacă în privința condiției (a), verificarea îndeplinirii acestei condiții este ușoară, în privința condiției (b) verificarea este mai grea. În hidraulica generală (v. Cap. I) criteriul aplicabilității proporționalității directe între viteză (sau debit) și pierderea de sarcină specifică (gradientul de presiune) este numărul lui Reynolds, definit ca:

$$Re = \frac{v d \rho}{\mu} \quad (23)$$

unde v este viteza medie de scurgere a fluidului în mișcare, în cm/s;

d — diametrul echivalent al canalului de curgere, în cm;

ρ — masa specifică a fluidului în mișcare, în g/cm³;

μ — viscozitatea absolută a fluidului în mișcare, în $\frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2}$ sau $\frac{\text{g} \cdot \text{s}}{\text{cm}}$.

În hidraulica mediilor poroase, aplicarea acestui criteriu este îngreuiată de necunoașterea exactă a diametrului echivalent d : α) pentru că secțiunea canalelor de pori are forme foarte variate și neregulate în general, pentru simplificare, se admite că secțiunea are forma unui poligon curbiliniu regulat, triunghi în cazul rocilor mai compacte și mai consolidate, patrulater, în cazul rocilor afinate, iar diametrul echivalent este diametrul cercului înscris în acest poligon curbiliniu și β) pentru că roca nefiind sortată, dimensiunile canalelor variază de la un loc la altul în rocă, așa cum variază dimensiunile grăunților.

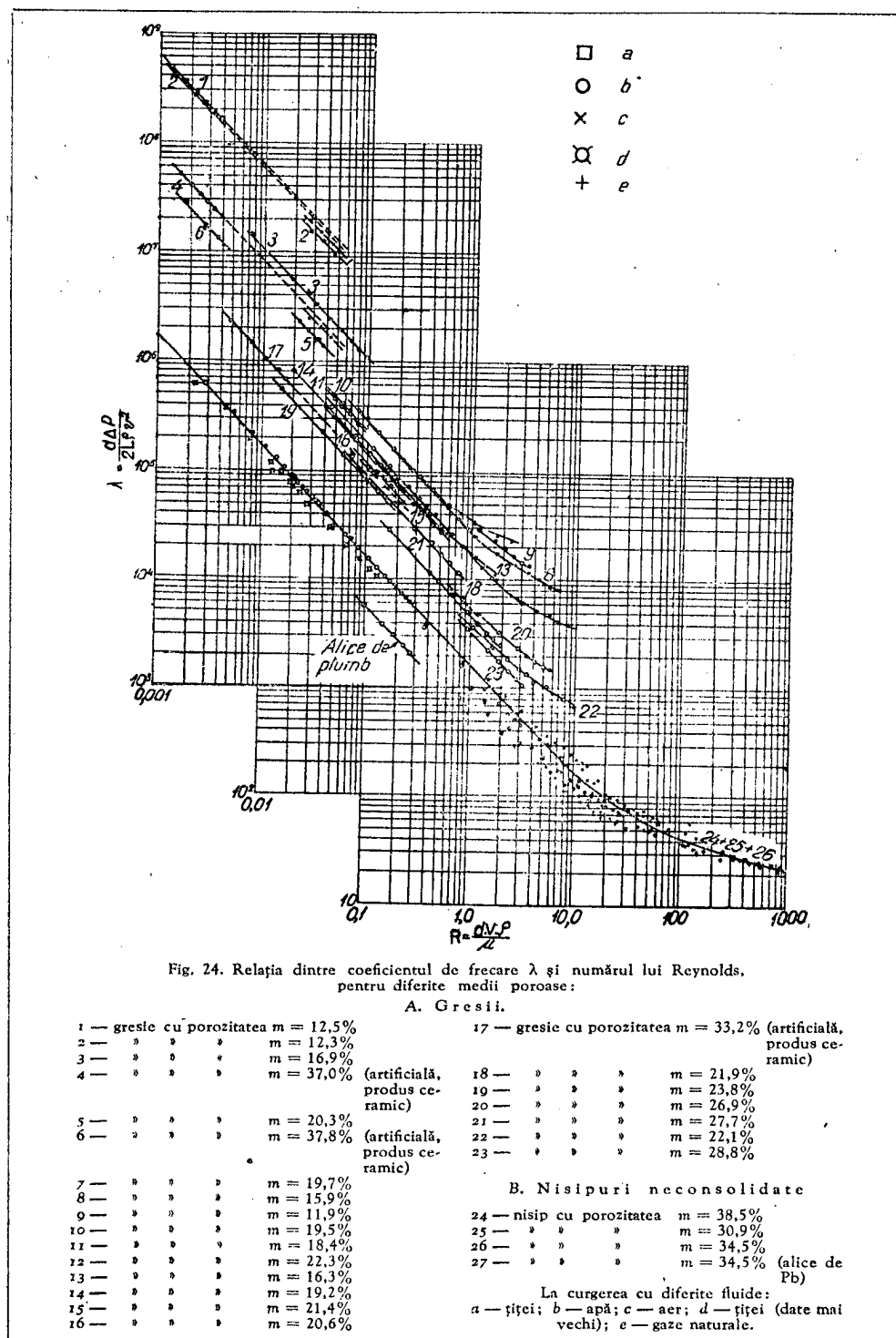
Aceasta are drept consecință practică faptul că, în realitate, trecerea de la regimul laminar la cel turbulent nu se face deodată în toate canalele ci, la început, în cele mai mari (cu diametru mai mare) și mai târziu, la viteze și la gradientii de presiune mai mari, în canalele mai mici. Afară de aceasta, pe cînd la scurgerea stabilizată prin canale deschise sau prin tuburi, în cazul fluidelor viscoase și incompresibile, toate pierderile se datoresc practic frecărilor, în cazul mediilor poroase, dimensiunile fiecărui canal variază de-a lungul liniilor de curent și, uneori, chiar în măsură foarte mare. Din această cauză, viteza efectivă prezintă variații importante de la por la por, iar învingerea forțelor de inerție necesare pentru a realiza accelerațiile corespunzătoare necesită un supliment mare de energie. Deoarece pierderile datorite accelerației fluidului sînt proporționale cu pătratul vitezei, aceste pierderi sînt neglijabile la viteze foarte mici, dar la depășirea unei anumite viteze, ele devin importante și necesită un supliment de energie proporțional cu v^2 , întocmai ca și pierderile de sarcină în regimul turbulent.

Din această cauză, aplicabilitatea legii liniare a filtrației este limitată, în mediile poroase, de numere Reynolds mult mai mici (circa 1 pentru nisipurile cimentate și circa 4 pentru nisipurile necimentate) decît în conducte cu diametru constant (2300—3000). Determinările experimentale ale coeficienților de frecare, λ , definiți din ecuația pierderii de sarcină (v. Cap. I):

$$P = \lambda \frac{\rho v^2}{2} \frac{L}{d} \quad (24)$$

au dat rezultatele reprezentate în fig. 24 și 25.

Cu toată această importanță limitare, aplicabilitatea legii liniare de filtrație la mediile poroase nu este practic împiedicată, din cauza



valorilor efective foarte mici ale numerelor Re. Astfel, de exemplu, în cazul unei sonde care deschide cu un diametru de 150 mm un strat cu grosimea de 3 m, viteza lichidului pentru un debit de $16 \text{ m}^3/\text{zi}$ este de ordinul $0,12 \text{ mm/s}$, iar numărul Re este de circa 0,05, pentru un ței relativ fluid (cu viscozitatea 1 cP și cu greutatea specifică 0,88) și pentru o rocă relativ grosolană (cu diametrul efectiv al canalelor de pori de 50μ). În aceleași condiții, la o distanță de sondă egală cu grosimea stratului, $Re = 0,0014$. În cazul sondelor

curgerea după regimuri neliniare, v. Cap. II, B.b.1 și D.b.).

Marea majoritate a rocilor sedimentare detritice prezintă o permeabilitate care variază cu direcția de scurgere. Din cauza particularităților determinate de legile curgerii prin medii cu permeabilități diferite (v. Cap. II, D.e.), permeabilitatea acestor roci este o proprietate vectorială, iar reprezentarea locului geometric al extremității acestui vector, pentru scurgerea după diferite direcții în jurul unui punct, ia forma unui elipsoid de rotație tur-

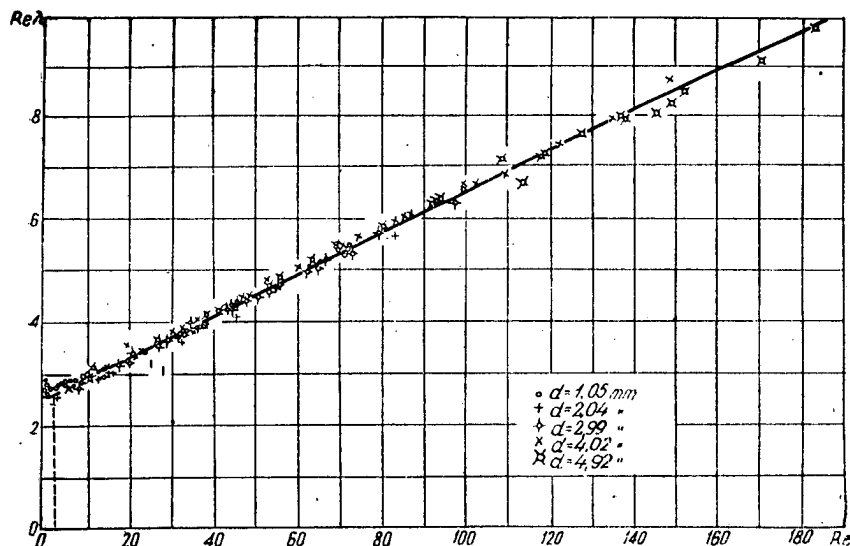


Fig. 25. Reprezentarea variației produsului Re, în funcție de numărul lui Reynolds, Re pentru medii poroase sortate, de diferite diametre, (după V. N. Scelkacev).

tubate și perforate relativ rar, există o zonă redusă în imediata apropiere a fiecărei perforatură, în care regimul laminar și proporționalitatea între gradientul de presiune și viteză nu mai persistă (v. Cap. II, imperfecțiunea sondelor din punctul de vedere al caracterului deschiderii). În aceste regiuni ale mediului poros, destul de limitate în spațiu, legea de curgere

$$v_s = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial s} \quad (25)$$

poate fi generalizată în forma:

$$v_s = c \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)^n \quad (26)$$

sau în forma:

$$\frac{\partial p}{\partial s} \approx a v_s + b v_s^2 \quad (27)$$

unde v_s este viteza după direcția s , ceea ce însă complică considerabil calculele și reduce aplicabilitatea practică a legii (referitor la

tit *), deoarece permeabilitatea după normala la suprafețele de stratificație este mai mică (și deseori mult mai mică) decât aceea după direcțiile cuprinse în aceste suprafețe. Totuși, în majoritatea problemelor de hidraulică subterană, pentru simplificare, se emite ipoteza unei izotropii a mediului poros din punctul de vedere al permeabilității. Această ipoteză este, în general, nejustificată, deoarece ea determină obținerea unor cimpuri deformate (în unele cazuri aceasta se poate corecta prin alegerea adecvată a direcțiilor axelor de coordonate și prin alegerea unei scări cu lungime diferită pentru axa paralelă cu normala la suprafețele de stratificație).

Valorile raportului $k_{\text{paralel}}/k_{\text{normal}}$, obținute la rocile-magazin din R.P.R., se situează frecvent între 1,5 și 6. Valori mai mari, fără a fi limitate, se obțin mai rar; ele se explică

*) Singura excepție o constituie rocile ale căror elemente minerale au una dintre dimensiuni mult mai mare decât celelalte două, de exemplu, rocile alcătuite din minerale din familia azbestului, care pot prezenta o înădăgine asemănătoare unui elipsoid alungit.

aproape totdeauna prin prezența în proba examinată a unor intercalații de minerale lamelare (mice) sau de minerale cu grăunte foarte fine și relativ tasate (material argilos). În același mod se explică faptul că acest raport este cu atât mai mare cu cât grosimea stratului cercetat este mai mare. Interpretarea care trebuie dată acestui rezultat (în ce privește generalizarea) depinde de faptul dacă prezența acestei intercalații perturbatoare (sau a altora) este un fenomen accidental, izolat, sau constituie o caracteristică a rocii respective, iar această problemă poate fi lămurită, în general, prin examenul vizual macro- sau microscopic al

în cursul fazei primare a exploatarei zăcămin-
tului.

b) *Determinarea experimentală a permeabi-
lității absolute se efectuează în laborator cu
ajutorul permeametrului, care permit deter-
minarea lui k din ecuația de debit în regim
laminar, printr-o probă cilindrică de rocă cu
secțiunea normală F .*

$$Q = \frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta s} F. \quad (28)$$

Permeametrul este alcătuit în principiu
din: 1) sursa de fluid sub presiune (compresor
sau butelie de înaltă presiune), respectiv sursa de vid
(pompa sau trompă), în cazul
determinării la presiuni joase;

2) dispozitivul de condiționare a stării chimice a fluidului folosit (uscător cu CaCl_2 , absorbitor de CO_2 cu KOH și de O_2 cu pirogalol, la nevoie); 3) dispozitivul de condiționare a stării fizice a fluidului folosit (regulator de presiune și, la nevoie, de temperatură); 4) dispozitive de închidere și de schimbare a schemei de curgere; 5) celula permeametrică în care se montează etanș proba; 6) manometre diferențiale pentru măsurarea căderii de presiune în probă; 7) uscător (necesar în special când manometrul diferențial funcționează cu apă) și 8) reometru, însoțit eventual, pentru verificare, de un contor volumetric.

În figura 26 este reprezentat un permeametrul numit «universal», care permite să se lucreze la o scară relativ largă de presiuni, în special pentru adaptarea la determinarea în condiții practice a probelor cu permeabilități foarte variate. Sursa de fluid sub presiune o constituie de obicei un compresor (1) cu rezervor-tampon (2). Uscarea este realizată în vasul (3) cu CaCl_2 , la presiunea compresorului, iar manometrele (4),

(6) și regulatorul (5) permit reglarea curgerii în condițiile dorite. Manometrul (11) cu Hg și manometrul (10), cu apă permit, după caz, măsurarea pierderii de presiune în carotă, respectiv controlul ei, în cazul când se lucrează cu presiune constantă și cu debit variabil.

Laboratorul central S.R.P. Cimpina folosește în acest scop «manostate», care asi-

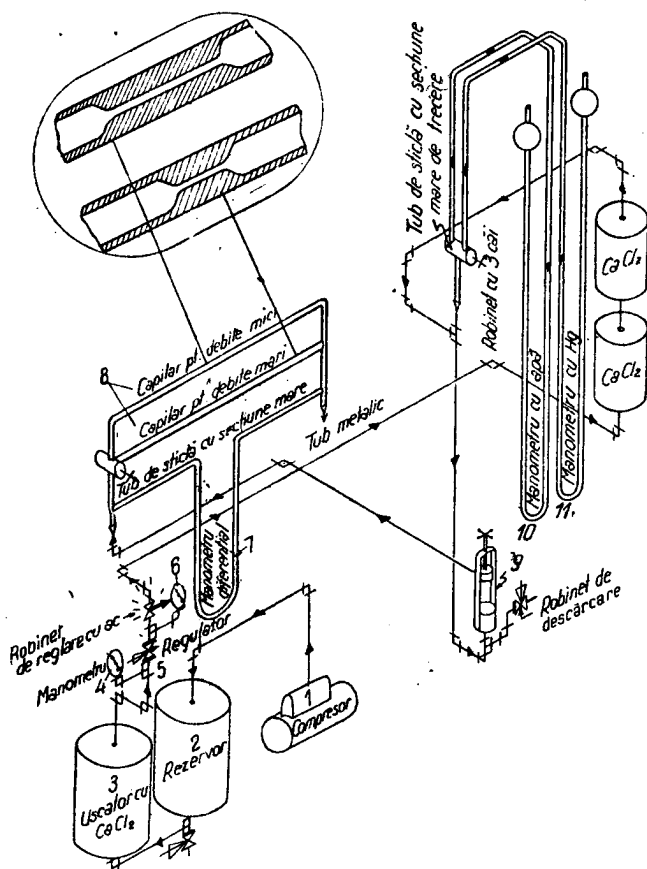


Fig. 26. Reprezentare schematică a unui permeametrul universal. În medallion, capilarele reometrului.

probelor (a se vedea și Cap. III B.b.9.a) 4)), anizotropia rocilor din punctul de vedere al rezistivității electrice).

Determinarea acestui raport prezintă o importanță deosebită pentru studiul proceselor de golire a zăcămintului și, deci, în special în cazul aplicării metodelor de refacere a energiei de zăcămint sau de recuperare secundară propriu-
isă; ea este cel puțin tot atât de importantă

gură o diferență de presiune constantă (v. fig. 27).

Celula permeametrică (12) reprezentată în mod detaliat în fig. 28, închide etanș suprafața laterală a carotei cilindrice prin aplicarea sub presiune a unui manșon de cauciuc moale

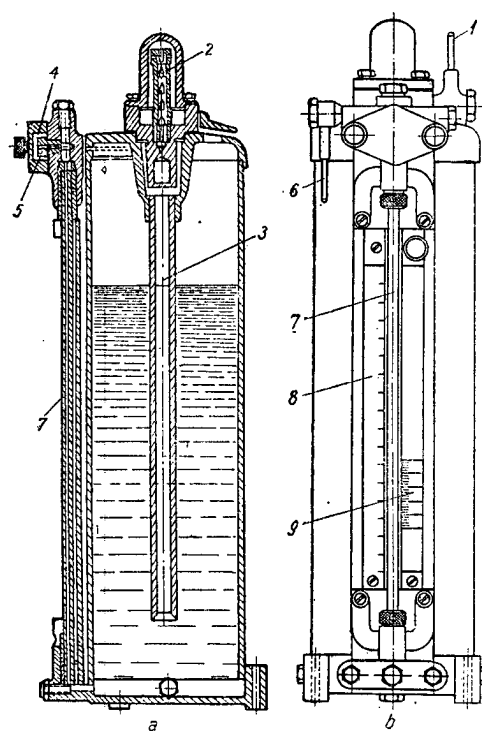


Fig. 27. Manometru diferențial cu lichid și cu regulator de presiune (Manostat): a. secțiune; b. vedere:
1 — tubulură de alimentare cu aer comprimat (intrare);
2 — orificii de strângere-amortizare (pentru partea — regulator de presiune); 3 — tub de descărcare pentru suprapresiune; 4 — camera de presiune constantă;
5 — orificiu de amortizare (pentru partea — manometru);
6 — tubulură cu livrarea aerului sub presiune constantă către permeametrul; 7 — sticlă de nivel alcătuind ramura activă a manometrului; 8 — scară micrometrică, ajustabilă; 9 — scară milimetrică, fixă.

Tabela 9. Dimensiunile probelor cercetate cu permeametrul Trebin

$d_1 = 25 \text{ mm}$	$l_1 = 50 \text{ mm}$
$d_1 = 25 \text{ mm}$	$l_2 = 100 \text{ mm}$
$d_1 = 25 \text{ mm}$	$l_3 = 200 \text{ mm}$
$d_2 = 50 \text{ mm}$	$l_1 = 50 \text{ mm}$
$d_2 = 50 \text{ mm}$	$l_2 = 100 \text{ mm}$
$d_2 = 50 \text{ mm}$	$l_3 = 200 \text{ mm}$
$d_3 = 75 \text{ mm}$	$l_1 = 50 \text{ mm}$
$d_3 = 75 \text{ mm}$	$l_2 = 100 \text{ mm}$
$d_3 = 75 \text{ mm}$	$l_3 = 200 \text{ mm}$

(de preferință spongios la interior). În cazul celulei pentru determinări universale (cu orice

fluid, eventual produse petrolifere sau țitei) — manșonul trebuie confecționat din cauciuc corespunzător, Sovpren, Neopren, Perbunan sau din Thiocol, care este mai ieftin și aproape satisfăcător. Închiderea perfect etanșă a probei în celulă are o foarte mare importanță, deoarece debitele măsurate sînt foarte mici și sporirea lor cît de mică, din cauza neetanșeității de montare a probei, provoacă alterarea rezultatelor.

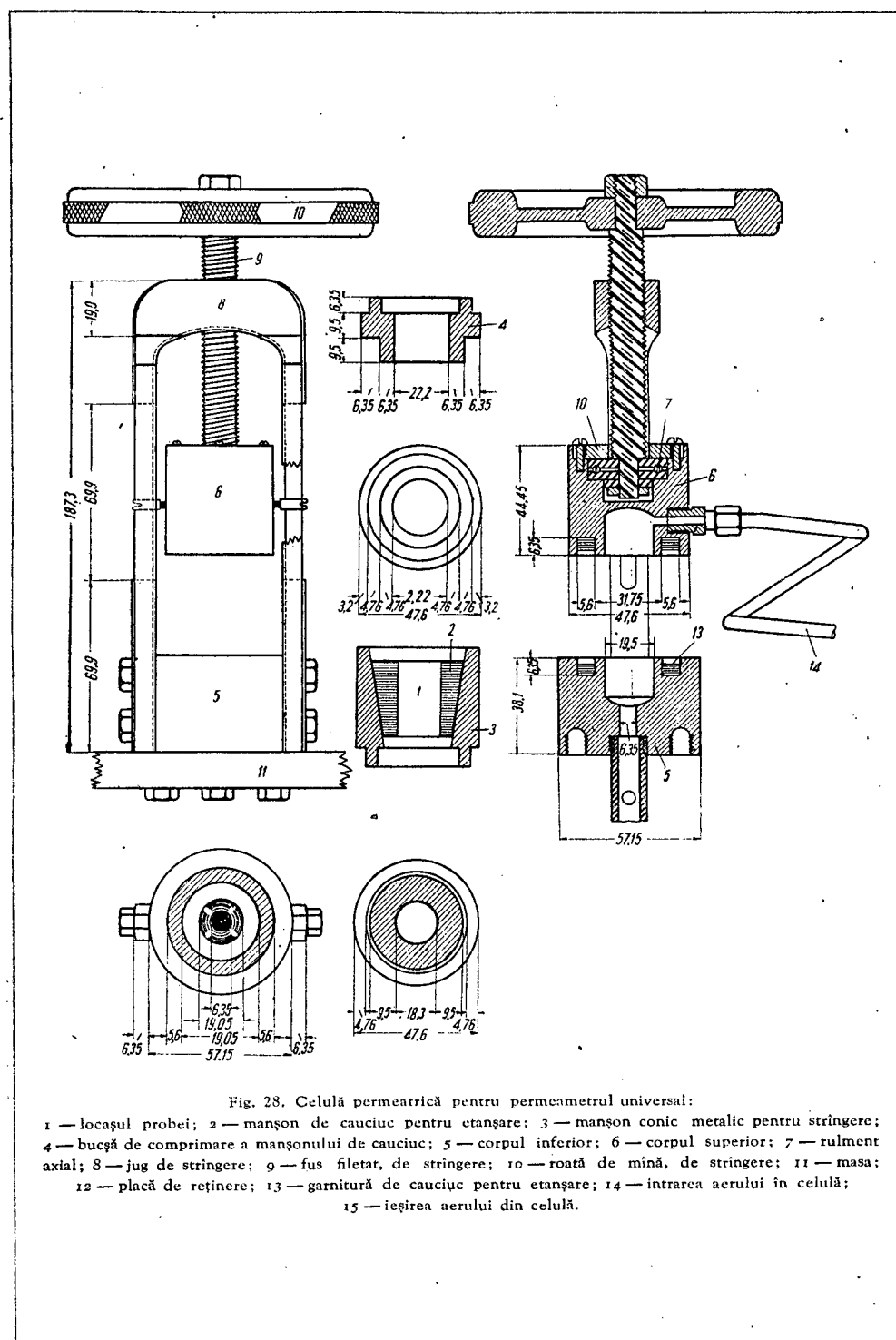
De aceea, se recomandă montarea probei prin chituire cu un mastic special (ceară-colofoniu, pentru lucrul cu gaze sau cu apă, chituri speciale, pentru produse petrolifere) într-o bușcă cilindrică avînd aceeași formă exterioară ca 3.

Pentru reducerea erorilor și a împrăștiierii rezultatelor, datorită dimensiunilor mici ale probei folosite în instalația reprezentată în fig. 26 (12—20 mm), F. A. Trebin folosește probe cu dimensiuni mai mari, fixate cu un mastic de rășini plastice.

Pentru lucrări de laborator mai exacte, el recomandă instalația reprezentată în fig. 29, care folosește în celula permeametrică, bușca 14 din seria indicată în tabela 9 pentru a se putea folosi probe cît mai mari de rocă, indiferent de forma inițială a probei, înlăturînd astfel efectele neomogenității rocii. Pentru fixarea probelor, autorul metodei recomandă prepararea chitului din deșeuri de disc de gramofon, topite în baie de ulei, cărora li se adaugă mici cantități de colofoniu pentru sporirea fuzibilității. Pentru lucrul cu presiuni joase, se pot folosi și mulaje în aliaje ușor fuzibile (Wood, Darcet, Lipovitz etc., v. Manualul ing. chimist). Pentru lucrări curente de șantier, el recomandă instalații mai simple (pentru detalii a se vedea F. A. Trebin: Neftepromiștostoi pescianih collectorov, Gosoptahizdat, 1945).

În cazul rocilor cu permeabilitate foarte redusă (roci de etanșare sau roci-magazin din zăcămintele de gaze), este necesar să se întrebuițeze exclusiv gaze și să se folosească secțiuni mari. În acest caz, F. I. Kotiahov recomandă folosirea unei instalații speciale de înaltă presiune, reprezentată în fig. 30 și 31.

Instalația este compusă din: un recipient 1 de înaltă presiune încărcat de obicei cu azot comprimat (aer sărăcit în oxigen provenit de la distilarea fracționată a aerului pentru fabricarea oxigenului), un rezervor tampon 2, care asigură, împreună cu regulatorul 3, stabilitatea presiunii de alimentare, manometrele 4, cu tub Bourdon 5 cu mercur și 6 cu apă, pentru măsurarea presiunii în amonte de probă, care în general, este practic egală cu pierderea de presiune în aceasta, celula permeametrică 7, reprezentată în detaliu în



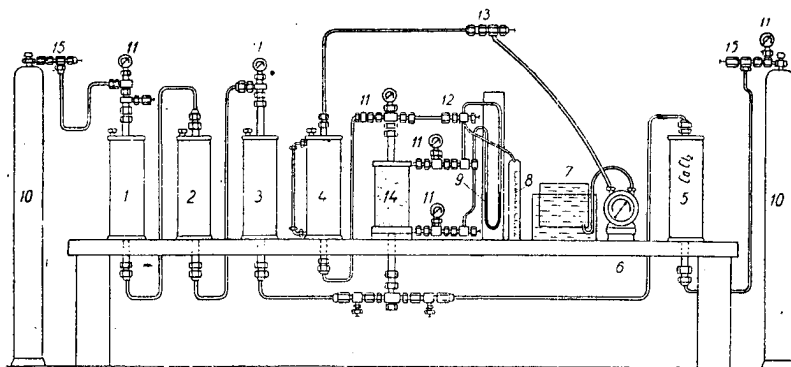


Fig. 30. Instalație de determinare a permeabilității, cu aplicație îndeosebi la măsurarea la presiuni ridicate a permeabilității mici a rocilor cimentate:

1 — recipient de aer comprimat; 2 — rezervor-tampon (vas de evacuare, în cazul lucrului cu lichid); 3 — regulator de presiune; 4 — manometru Bourdon; 5 — manometru cu mercur; 6 — manometru cu apă; 7 — celulă permeametrică; 8 — manometru Bourdon.

fig. 32 și manometrul cu tub Bourdon 8, pentru măsurarea presiunii în aval de probă, folosit în cazul particular când se lucrează cu presiune medie ridicată în probă. În acest caz, manometrele 5 și 6 nu sînt folosite. Manometrele cu tub elastic folosite sînt manometre de

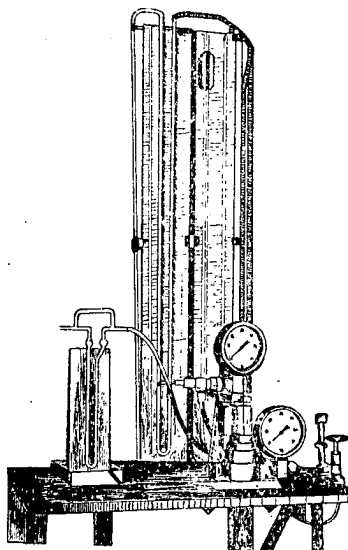


Fig. 31. Vederea instalației din fig. 30 (în stînga, reometrul).

precizie, de preferință cu dublă indicație, reetalonate la intervale de timp regulate prin comparație cu un manometru cu greutate. Din cauza presiunilor înalte de lucru (Kotiahov a lucrat pînă la 400 at), celula permeametrică este dimensionată mai solid, iar fixarea probei necesită, pentru etanșare, ca manșonul de cauciuc 5 să nu mai fie comprimat axial, ci radial, de seria de pene metalice 6, care, prin împingerea axială a piuliței 8 în locul conic al manșonului 9, asigură o strîngere radială convergentă a ansamblului 5 + 6. Instalația se poate folosi cu rezultate relativ bune și la determinarea permeabilității efective cu diferite fluide (cu modificările corespunzătoare la rezervorul-tampon 2).

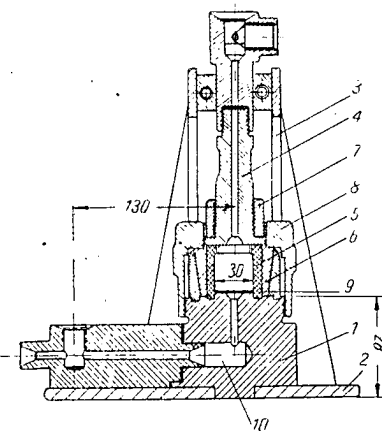


Fig. 32. Celula permeametrică (piesa 7 din fig. 30): 1 — corpul celulei; 2 — manșon; 3 — braț pentru asigurarea presiunii axiale, necesară etanșeității; 4 — tub pentru strîngerea și ieșirea fluidului din probă; 5 — manșon de cauciuc; 6 — manșon cu pene metalice; 7 — buca de strîngere; 8 — piulița de strîngere; 9 — manșon metalic cu fața interioară conică pentru acționarea penelor; 10 — intrarea fluidelor în probă.

Pentru determinarea permeabilității absolute, la presiuni joase, pentru roci cu permea-

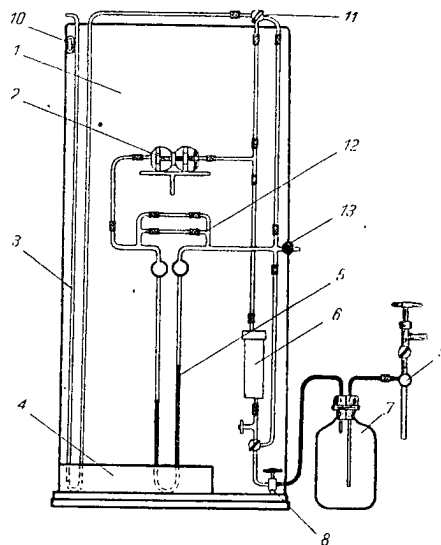
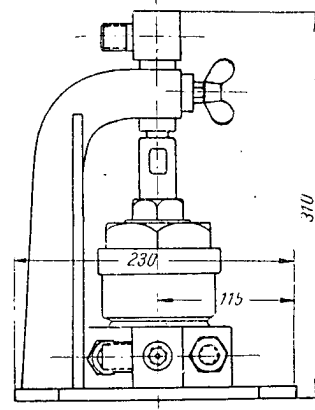


Fig. 33. Schema unei instalații pentru determinarea la presiuni scăzute și în vid, a permeabilității rocilor cu permeabilitate mare (după Kotiahov): 1 — panoul general; 2 — celula permeametrică (vezi fig. 36); 3 — manometru diferențial cu mercur putînd lucra și ca barometru, pentru măsurarea presiunii de ieșire din probă aerului; 4 — masa; 5 — manometru diferențial pentru măsurarea căderii de presiune în probă; 6 — vas-tampon pentru amortizarea variațiilor de presiune; 7 — vas-tampon și separator de control (numai pentru lucrul la presiuni inferioare celei atmosferice); 8 — robinet cu ac; 9 — robinet cu trei căi; 10 — balon pentru captarea mercurului în caz de supra-presiune; 11 — robinet cu trei căi; 12 — robinet cu trei căi (pentru reometrul); 13 — robinet de descărcare la atmosferă.

bilitate mare, Kotiahov recomandă instalația reprezentată în fig. 33, cu care se poate deter-



mina permeabilitatea și la presiuni inferioare celei atmosferice, datorită faptului că în loc ca să fie alimentată cu gaz sub presiune, ea are ieșirea celulei permeametrice legată cu o trompă de apă 9 prin intermediul unui vas-tampon 7 care amortizează variațiile de presiune date de trompă.

Pentru determinarea debitului, instalația are un reometru compus din manometrul diferențial 5 și perechea de capilare 12, care pot fi schimbate repede cu altele. Întreaga serie de capilare este etalonată astfel, încât raportarea

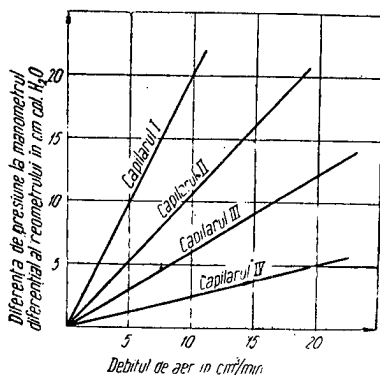


Fig. 34. Diagramă de etalonare a reometrului cu patru capilare date la o temperatură cunoscută (debite de aer în funcție de depresiunea manometrului diferențial).

pe o diagramă de tipul celei din fig. 34 a diferenței de presiune citită la diferențialul 5, permite citirea debitului-volum de aer. La construcția diagramei reprezentate în fig. 34, folosită pentru cazul cînd presiunea medie în probă este relativ înaltă, s-a interpolat liniar printre punctele determinate experimental. În cazul lucrului cu presiuni medii în probă, sub cea atmosferică, etalonarea trebuie făcută mai îngrijit, cu puncte mai multe pe toată scara, interpolarea liniară fiind admisibilă numai pe segmente scurte, iar linia ne mai fiind o dreaptă, din cauza importanței fenomenelor de alunecare care intervin la presiuni absolute joase, extrapolarea nu mai este permisă.

Pentru cazul cînd se efectuează un număr mare de probe, cu dimensiuni standardizate, se poate construi o diagramă de etalonare a reometrului direct în permeabilități, ca în fig. 35. La această diagramă este chiar mai necesar decît la diagrama din fig. 34 să se țină seama de influența fenomenelor de alunecare în cazul presiunilor absolute joase. Dacă lucrul la temperatură constantă nu poate fi asigurat în limita a $\pm 0,5^\circ\text{C}$, trebuie să se înregistreze temperatura de lucru a fiecărei probe, să se folosească cîte o diagramă de etalonare pentru fiecare temperatură. Construcția acestor diagrame pe baza uneia dintre ele și pe baza corecției de temperatură este admisibilă. În

acest scop, se pot folosi datele de variație a viscozității apei și a aerului din tabela 10.

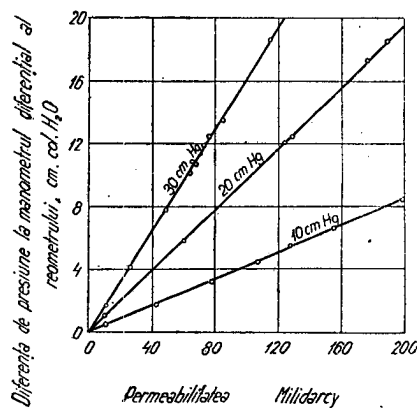


Fig. 35. Diagramă de etalonare a unui reometru direct în permeabilități, la temperatură cunoscută (figurat etalonarea unui singur capilar, pentru diferite depresiuni).

Tabela 10. Variația viscozității absolute a apei și a aerului în scara temperaturilor uzuale

A p a		A e r u l *	
T, °C	μ cP	T, °C	μ cP
15	1,145	0	0,01709
16	1,116	10	0,01759
17	1,088	20	0,01808
18	1,060	30	0,01856
19	1,034	40	0,01904
20	1,009	50 **	0,01951
21	0,984	100	0,02220
22	0,960		
23	0,938		
24	0,916		
25	0,895		
26	0,875		
27	0,855		
28	0,836		
29	0,818		
30	0,800		

*) Viscozitatea absolută este independentă de presiune

**) Viscozitatea absolută a aerului în intervalul de 0...50° poate fi dedusă cu o eroare relativă de ordinul $6 \cdot 10^{-5}$ cu formula

$$\mu_{aer} = 0,17090 [1 + 10^{-3} \cdot 2,9306 \cdot t - 10^{-6} \cdot 1,956 t^2].$$

La această instalație, pentru ușurarea lucrului în serie, celula permeametrică este asemănătoare celei reprezentate în fig. 36. Etanșarea probei în manșon se face cu mastic în bușă 3, cu care instalația este dotată în mare număr. Prin folosirea grătarului 4 și a montajului în mastic, se pot prelucra probele cele mai friabile și, cu precauții speciale, chiar nisip neconsolidat. În cazul probelor cu friabilitate exagerată, pentru a preveni dezagregarea lor chiar în cursul operațiilor premergătoare (extracție cu solvent și uscare), proba este montată în manșon încă înainte de efectuarea acestora. Deoarece masticul lui Mendeleev, întrebuințat de obicei la probele curente de permeabilitate este solubil în aproape toți solvenții

folosiți pentru extracție, se utilizează un mastic insolubil în acești solvenți, compus din litargă și din glicerină, al cărui singur dezavantaj, afară de prețul glicerinei, constă în faptul că se demontează greu (probele trebuie sfărâmate, masticul se îndepărtează greu pe cale mecanică, iar procedeele chimice nu cruță manșonul metalic decât dacă acesta este confecționat din aliaj anticoroziv, inoxidabil).

Determinarea pe această cale a permeabilității absolute a probelor de rocă necimentată nu este concludentă din cauza afinării lor.

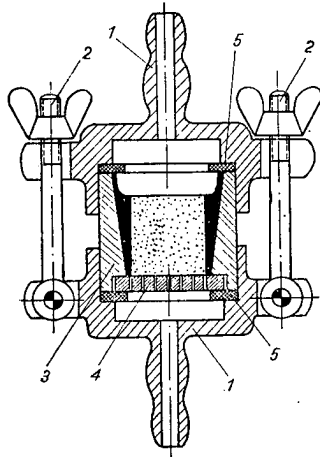


Fig. 36. Celulă permeametrică (detaliu la piesa 2, fig. 33):

1 — racord de intrare a aerului; 2 — șuruburi de strângere pentru etanșare; 3 — manșon metalic cu fața interioară conică (serie numeroasă de piese de schimb); 4 — grătar de sprijin; 5 — garnituri de cauciuc pentru etanșare.

Pentru înlăturarea acestui efect, Ustinov a propus determinarea permeabilității asupra unei probe supuse simultan unei presiuni egale cu presiunea litostatică de zăcămint a rocii respective. În acest scop, el a construit celula permeametrică reprezentată în fig. 37. În manșonul cilindric 1, nisipul este comprimat pe grătarul 7, de pistonul 2 cu fund perforat. Pentru înlăturarea efectelor de capăt, grătarele sînt echipate cu o serie de site supra-puse, cu dimensiuni de ochi care cresc de la probă către grătarul de reazem.

După turnarea probei în manșonul 1 și după o tasare sumară, se introduc garnitura de cauciuc 5, garnitura de Al sau de hîrtie impregnată 6, pistonul 2 și piesa lui de reazem 4, iar întreaga celulă se comprimă cu ajutorul unei prese hidraulice la presiunea corespunzătoare celei litostatice. După circa 30 minute de menținere a acestei presiuni, procesul de tasare este practic terminat și se procedează la determinarea permeabilității prin trecerea unui fluid corespunzător scopului urmărit, prin tuburile 8 și 9.

Pentru determinarea permeabilității absolute cu ajutorul lichidelor, F. I. Kotiahov a conceput o instalație adaptată acestui scop, reprezentată în fig. 38.

Această instalație este constituită din: un montejuș 1, din care, cu ajutorul aerului sau al azotului comprimat, introdus prin robinetul cu ac 3, lichidul este refulat prin celula permeametrică 7, identică cu cea reprezentată în fig. 36, pînă la vasul colector 10.

Pentru cunoașterea presiunii disponibile și pentru prepararea lucrării, se folosește manometrul 4, pentru reglarea presiunii și a debitului, robinetul cu ac 2, pentru măsurarea presiunii, respectiv a căderii de presiune de lucru, manometrul cu tub Bourdon 5 sau manometrul cu mercur 6. Determinarea se efectuează după procedura clasică, cu particularitatea că este necesară o saturație completă prealabilă a probei de rocă cu lichidul întrebuițat pentru determinări. În acest scop, se poate folosi fie tehnica obișnuită, cu vid, într-un aparat exterior instalației, fie instalația însăși cu proba montată în celulă. Aparatul este ținut în acest caz în vid întreținut cît mai înaintat, timp de cel puțin o oră, perioadă la sfîrșitul căreia vidul trebuie să se mențină dacă se separă legătura cu pompa de vid sau cu trompa, ceea ce constituie o verificare a golirii complete de lichide.

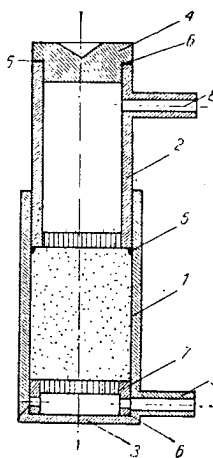


Fig. 37. Celulă permeametrică pentru reconstituirea sub presiune a stării de tasare din zăcămint a nisipurilor necimentate (după Ustinov):

1 — corpul celei; 2 — pistonul celei; 3 — fundul celei (și piesa de reazem); 4 — capac piesă de strângere; 5 — garnitură de cauciuc; 6 — garnitură de aluminiu sau de hîrtie; 7 — grătar de sprijin; 8 — tub de intrare a fluidului de probă în celulă; 9 — tub de ieșirea fluidului de probă din celulă.

(Dacă proba nu a fost spălată și extrasă cu solvent în extractorul Soxhlet, aceasta se poate efectua chiar în instalație, însă această spălare trebuie efectuată înainte de saturarea cu fluid de probă). În această situație, lichidul din tubul din amont de robinetul cu ac 2, în prealabil golit de aer prin umplerea cu lichid, este lăsat să pătrundă în celula permeametrică 7. O eventuală vaporizare parțială inițială a lichidului din cauza presiunii absolute joase nu este supărătoare, deoarece prin creșterea ulterioară a presiunii în aparat peste presiunea de vapori, la temperatura corespunzătoare a lichidului de probă, acesta condensează integral, astfel încît curgerea monofazică este asigurată. Tre-

buie observat că, deși extragerea cu solvent a probei se poate efectua chiar în permeametrul, ea nu înlătură necesitatea extragerii în extractor decât în cazul particular când s-ar renunța la determinarea porozității sau când lichidul folosit pentru determinarea permeabilității nu

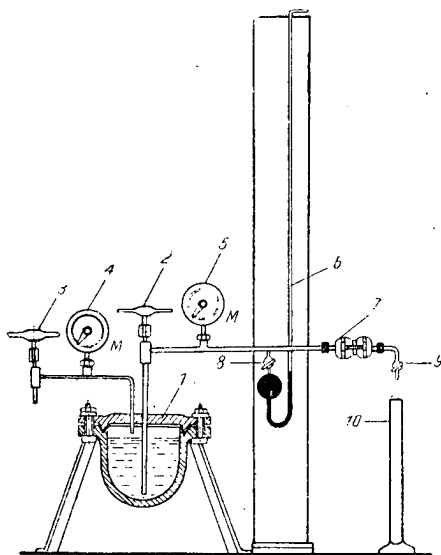


Fig. 38. Instalația pentru determinarea permeabilității cu ajutorul lichidelor (după F. I. Kotiahov): 1 — vas de deplasare a lichidului cu gaz comprimat (monte-jus); 2 — robinet cu aer; 3 — robinet cu apă; 4 — manometru pentru măsurarea presiunii disponibile; 5 — manometru pentru măsurarea presiunii la intrarea în probă (în cazul presiunilor mari); 6 — manometru diferențial cu Hg pentru măsurarea presiunii la intrarea în probă (în cazul presiunilor mici); 7 — celula permeametrică (vezi fig. 36); 8 — robinet pentru scoaterea din circuit a manometrului cu Hg, în cazul lucrului la presiuni mari; 9 — robinet de descărcare; 10 — cilindru gradat pentru colectarea și pentru măsurarea lichidului trecut prin probă.

dizolvă masticul folosit pentru prinderea probei în celulă. Chiar și în acest caz, îndepărtarea masticului de pe probă rămâne o problemă a cărei rezolvare practică este grea.

Pentru determinarea permeabilității absolute cu aer la presiuni absolute foarte joase, se poate folosi dispozitivul indicat schematic în fig. 39. În acest caz, trebuie să se țină seama de variația volumului specific al gazului care curge prin probă, chiar la curgerea de-a lungul probei. Ecuația lui Darcy:

$$k = - \frac{Q_x \mu}{F} \cdot \frac{dx}{dP} \quad (29)$$

aplicată unui element de parcurs, trebuie integrată între extremitățile probei și dacă:

Q_x este debitul-volum în cm^3/s în secțiunea situată la distanța x de extremitatea probei;

F — secțiunea normală pe direcția de curgere a probei, în cm^2 ;

P — presiunea absolută a gazului, în secțiunea x , în kg/cm^2 ;

μ — viscozitatea absolută a gazului, în cP;

$Q_b = Q_x \cdot P/P_b$ — debitul-volum în cm^3/s , măsurat la,

P_b — presiunea barometrică din momentul probei,

rezultă:

$$k = \frac{Q_b \mu L}{F} \cdot \frac{2 P_b}{P_1^2 - P_2^2}, \quad (30)$$

unde: P_1 este presiunea absolută a gazului la intrarea în probă;

P_2 — presiunea absolută a gazului la ieșirea din probă.

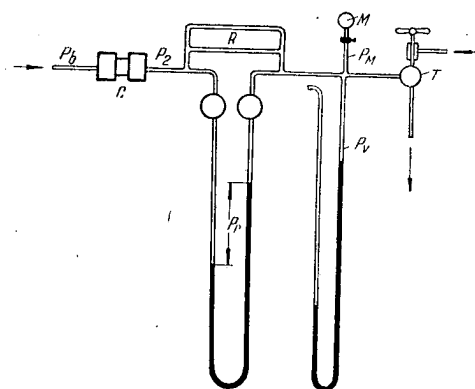


Fig. 39. Dispozitiv pentru determinarea permeabilității la presiuni inferioare celei atmosferice: P_b — presiunea barometrică în momentul probei; C — celula permeametrică; P_r — diferența de presiune (pierdută în probă); P_v — presiunea absolută la ieșirea din probă (vid parțial); M — manometru cu tub metalic care indică diferența $P_b - P_v$; T — trompă de vid cu apă.

Dacă se notează debitul-volum mediu aritmetic cu

$$\bar{Q} = \frac{2 Q_b P_b}{B_1 + P_2}, \quad (31)$$

ecuația care dă valoarea lui k capătă iar forma ecuației lui Darcy pentru lichide:

$$k = \frac{\bar{Q} \mu L}{F (P_1 - P_2)} \quad (32)$$

În cazul particular al determinărilor la presiuni inferioare celei atmosferice, folosind notațiile din fig. 39, rezultă

$$k = \frac{\bar{Q} \mu L}{F (P_b - P_r - P_v)} \quad (33)$$

unde

$$\bar{Q} = \frac{2 Q_b P_b}{P_b + P_r + P_v} \quad (34)$$

în cazul cînd se folosește manometrul cu mercur care dă presiunea absolută P_b ; respectiv:

$$k = \frac{\bar{Q} \mu L}{F(P_n - P_r)} \quad (35)$$

unde

$$\bar{Q} = \frac{2 Q_b P_b}{2 P_b - P_n + P_r} \quad (36)$$

în cazul cînd se folosește manometrul cu tub Bourdon care dă diferența P_M dintre presiunea atmosferică și cea absolută, obținută cu ajutorul trompei.

c) Etalonarea reometrelor. Etalonarea reometrelor se face prin montarea în serie cu un contor volumetric de gaze cu debit nominal mic. Instalația cea mai simplă are: un regulator de presiune sau un manostat cu mercur M

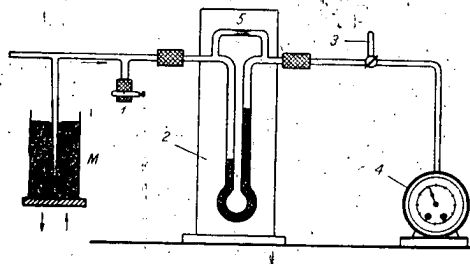


Fig. 40. Instalație pentru etalonarea reometrelor folosite în permeetrie, cu ajutorul unui contor volumetric: M — manostat cu mercur; 1 — ramificație cu tub de cauciuc și cu clemă cu deschidere variabilă pentru reglarea (prin descărcarea surplusului) debitului de aer prin reometru; 2 — manometru diferențial; 3 — robinet de descărcare către atmosferă; 4 — contor volumetric de gaze; 5 — capilar de măsurare.

(fig. 40), un dispozitiv de descărcare pentru reglarea debitului de aer, constituit din ramificația 1, legată cu un tub de cauciuc, de o deschidere reglabilă cu o clemă cu șurub, reometru 2, compus dintr-un capilar legat în paralel cu un manometru diferențial (de obicei cu mercur, mai rar cu apă) și un robinet cu trei căi 3 pentru înlăturarea din circuit a contorului volumetric 4.

Operația cuprinde: 1) reglarea presiunii de alimentare prin reglarea manostatului M (reglarea cotei fundului recipientului); 2) reglarea debitului de gaze care trece prin reometru, cu ajutorul clemei ramificației 1, astfel încît depresiunea indicată de manometrul diferențial al reometruului să fie cea maximă admisibilă în acesta, robinetul 3 fiind deschis către reometru și către comunicația cu atmosfera, dar închis spre contorul 4; 3) determinarea debitului efectiv cu ajutorul contorului și al unui cronometru, pe un interval de timp

suficient de lung pentru a reduce erorile datorite nedeclanșării cronometruului, la începutul, respectiv la sfîrșitul determinării, exact în momentul trecerii acului prin dreptul unei diviziuni a cadranelui contorului; 4) reportarea pe o curbă de presiune $= f(\text{debit})$; ca cea reprezentată în fig. 34, a rezultatului obținut; 5) repetarea întregii serii de operații cu instalația reglată cu ajutorul clemei din 1, la un nou debit (respectiv depresiune) mai mic. În absența fenomenelor de alunecare sau de turbulență, linia trasată prin punctele determinate experimental trebuie să fie o dreaptă care trece prin originea sistemului de coordonate.

În lipsa unui contor volumetric de gaze suficient de precis, se recomandă instalația

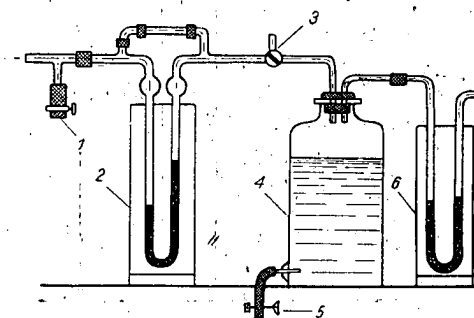


Fig. 41. Instalație pentru etalonarea reometrelor folosite în permeetrie, în lipsa unui contor volumetric: M — manostat cu mercur; 1 — ramificație cu tub de cauciuc și cu clemă cu deschidere variabilă pentru reglarea (prin descărcarea surplusului) debitului de aer prin reometru; 2 — manometru diferențial; 3 — robinet de descărcare către atmosferă; 4 — vas colector de gaz, cu apă; 5 — robinet de descărcare pentru 4; 6 — manometru diferențial de „zero”.

reprezentată în fig. 41, al cărei contor volumetric clasic este înlocuit printr-un vas cu apă 4, care poate fi descărcat printr-un robinet sau printr-un tub cu clemă 5, presiunea aerului din vasul 4 fiind menținută egală cu cea atmosferică, ceea ce se poate verifica cu manometrul diferențial 6. Pentru măsurarea cît mai exactă a debitului de aer trecut prin reometru, nu se măsoară denivelarea în vasul 4, ci volumul de lichid cules prin 5, într-un cilindru gradat cu diametru mic.

Pentru a se ține seama de faptul că la temperatura efectivă de lucru, alta decît aceea de etalonare a reometruului, și la o presiune efectivă de lucru diferită de cea de etalonare, debitul de aer diferă de cel citit pe curba de etalonare, se face la nevoie, corecția debitului cu relația:

$$q_c = q_e \frac{P_e T_p (2P_p + P_r)}{P_p T_e (2P_e + P_r)} \quad (37)$$

în care q_c este debitul-volum corectat, în cm^3/s ; q_e — debitul-volum rezultat din citire pe curba de etalonare, în cm^3 ;

- P_e — presiunea absolută la care s-a făcut etalonarea, în kg/cm^2 ;
 P_p — presiunea absolută, presiunea atmosferică din reometrul probei, în kg/cm^2 ;
 P_r — căderea de presiune în reometru, în kg/cm^2 ;
 T_e — temperatura absolută din momentul etalonării, în $^{\circ}\text{K}$;
 T_p — temperatura absolută din momentul probei, în $^{\circ}\text{K}$.

Ecuția (37) fiind omogenă, mărimile cuprinse în ea pot fi luate în orice unități de măsură, bine înțeles aceleași pentru mărimile de aceeași dimensiuni.

În limitele normale de variație a temperaturii (circa 10°C diferență) și a presiunii (circa 30 mm col Hg) erorile se situează între ± 2 și 3 % în cazul când se lucrează cu presiuni $P_p < P_e$, respectiv ± 15 % în cazul când se lucrează cu vid, $P_p < P_e$.

d) Pregătirea epruvetei pentru determinarea permeabilității. Pentru extragerea cu solvent, alegerea acestuia și procedura (a se vedea Cap. III B. b. 4. b, 2)); pentru înlăturarea cit mai completă a apei, operația de uscare în etuvă este considerată indispensabilă. Temperatura de reglare a termostatului acesteia este mult discutată. Cercetătorii clasici recomandă 110°C , dar F. A. Trebin propune să nu se depășească $50 \dots 60^{\circ}\text{C}$, pentru a nu se înlătura decît umiditatea adsorbită și nu apa de cristalizare. În cazul cînd cimentul epruvetei este exclusiv silicios-argilos sau chiar calcaros, temperatura limită de 110°C poate fi acceptată. În cazul cînd cimentul epruvetei este în parte gipsos, este valabilă recomandarea lui Trebin, deoarece $\text{SO}_4\text{Ca} + 2\text{H}_2\text{O}$ pierde prima moleculă de apă la 107°C . Pe de altă parte, înlăturarea umidității adsorbite nu se obține decît foarte încet la temperaturi între $60 \dots 90^{\circ}\text{C}$. De aceea, se recomandă activarea uscării prin vid, în cazul cînd etuva disponibilă permite aceasta cum și controlul ponderii constante prin cîntărire repetată după o a doua uscare de circa două ore. Între încălzire și cîntărire, proba este răcită în exsicator, unde, aproape totdeauna, se poate realiza un vid parțial destul de înaintat pentru accelerarea uscării. Trebuie observat că atingerea ponderii constante, chiar în aceste condiții, nu asigură înlăturarea completă a apei, ci numai realizarea stării de echilibru între umiditatea probei și aceea a camerei la temperatura de cîntărire. Acest stadiu de uscare este suficient pentru majoritatea analizelor, chiar pentru cele pretențioase, cu excepția epruvetelor cu material cu granulometre foarte fină și a acelor care conțin Mg Cl_2 în cantitate apreciabilă. În aceste roci, prezența umidității rămase alterează relativ puțin permeabilitatea măsurată cu ajutorul gazelor. Pentru măsurarea permeabilității cu lichide

nemiscibile cu apa însă, influența prezenței acestui rest de apă este importantă și poate determina aplicarea unor procedee speciale pentru îndepărtarea ei.

Forma și dimensiunile necesare ale epruvetei se dau prin tăiere, respectiv prin sfărîmare, cu unelte adecvate. În cazul rocilor cu rezistență mecanică mică, prelucrarea manuală este necesară, folosindu-se în acest scop scule obișnuite de mîna în special peria de sîrmă pentru finisaj. În cazul rocilor cu rezistență mecanică mare, lucrul manual este lent și nesigur, dînd forme mai neregulate; de obicei, fragmentele obținute prin sfărîmare, se aduc la forma cilindrică prin abraziune pe un disc

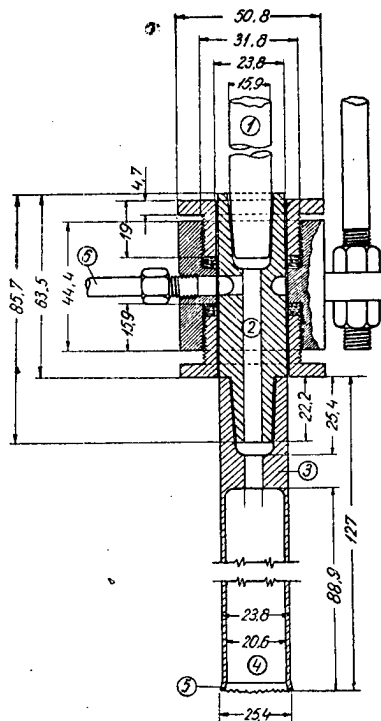


Fig. 42. Freză specială pentru tăiat cilindri de probă din carote: 1 — axul de comandă; 2 — piesa de cuplaj (avînd rolul « capului de injecție » de la instalația de foraj); 3 — corpul frezei; 4 — locașul probei; 5 — inserții de diamante industriale (boarts); 6 — intrarea aerului.

de polizor cu mișcare rapidă. În cazul acestor roci, prelucrarea mecanică este preferabilă, atît ca viteză de lucru, cît și ca acuratețe. În acest scop, se taie epruvete cilindrice din fragmentele mai mari de rocă, fie cu ajutorul unei freze cu diamant (fig. 42) sau cu aliaje dure (v. vol. I), fie printr-un procedeu în totul asemănător carotajului cu alicie (v. vol. I). În acest caz capul tăietor al carotierei este confecționat din cupru moale, iar aliciele sînt înlocuite cu pulbere de carborund, provenite

eventual din deșeuri de piatră de polizor, de altă origine, sau chiar recuperate de la operații de aceeași natură, pe cale de sedimentare, datorită greutateii specifice mari a carborundului (3,2) față de elementele minerale ale rocii (2,68). Corindonul sau șmirghelul, mai puțin dure și mai puțin recomandate, dar mai ieftine, pot fi recuperate mai ușor (densitatea 3,75—4,0). Bazele plane ale epruvetei se realizează pe discul plan al polizorului, respectiv pe un disc de cupru cu pulbere abrazivă.

Referitor la dimensiunile epruvetei, afară de cele menționate la Cap. III C. b. și d., trebuie precizat că lungimea suficientă a epruvetei (de dorit peste 30 mm) este mai importantă decât diametrul dacă mijloacele de etanșare sînt eficiente în ce privește contactul cu suprafața laterală a cilindrilor-epruvetă. La lungimi mai mici, de ordinul 10 mm, pot interveni erori de ordinul 10 % asupra permeabilității, în general în plus (permeabilitatea reală este mai mică decât cea determinată), datorită dezagregării parțiale a materialului din epruvetă la prelucrarea fețelor.

În privința masticurilor sau a aliajelor de prindere și de etanșare, este de observat că pe cînd toate masticurile uzuale sînt satisfăcătoare din punctul de vedere al etanșeității, dar nu totdeauna din punctul de vedere al solubilității în fluidul de probă și al posibilității de îndepărtare ușoară, aliajele ușor fuzibile (Wood, Darcet, Lipowitz, tipografic), din contra, sunt insolubile în solvenții uzuali, nu contaminatează epruveta și pot fi complet îndepărtate prin topire, dar nu asigură etanșarea suficientă a probei și provoacă alterări parțiale ale probei la montaj și la încălzirea pentru îndepărtare.

Aliajul tipografic Sn—Sb, cu tensiune superficială redusă, etanșează mai bine, dar provoacă la montare și îndepărtare o încălzire a probei la temperatură mai mare.

Închiderea cu garnitură de cauciuc sponigos la interior și neted la suprafață este foarte bună din toate punctele de vedere, dar necesită și ea precauții speciale, în cazul probelor deosebit de friabile.

Masticul de litargă se prepară din 90 % (ponderal) litargă, încălzită în prealabil la circa 300°, pentru îndepărtarea anhidridei carbonice și din 10 % glicerină tehnică, chiar colorată.

Masticul lui Mendeleev se prepară din 60 % (ponderal) colofoniu, 15 % ceară și 25 % miniu de plumb. După calitățile ingredientelor, punctul lui de topire este mai mult sau mai puțin apropiat de 50—60°. El necesită topirea înainte de montarea probei, preîncălzirea acesteia și aplicarea cu o spatulă metalică încălzită. Priza acestui mastic este practic instantanee (simultană solidificării prin răcire), pe cînd priza completă a masticului de litargă-glicerină durează peste două ore, ceea ce mărește durata probei.

6. Determinarea conținutului de cloruri din probe. Determinarea conținutului de cloruri din probe este necesară: pentru a stabili eroarea făcută la determinarea volumului spațiului de pori, prin faptul că o parte din acesta este ocupat de cristalele de sare, pentru a se verifica rezultatele asupra salinității apei extrase din sondă ulterior și eventual pentru a putea preciza originea acestuia, pentru a corecta datele curbei de rezistivitate de pe carotajul electric etc.

Determinarea obișnuită cuprinde: extragerea și spălarea probelor în vederea determinării porozității și eventual a permeabilității și, după efectuarea tuturor cercetărilor care se efectuează fără distrugerea rocii, spălarea pe filtru, cu apă distilată, în porțiuni succesive, a probei, de preferință sfărîmată și la cald. După un număr suficient de culegeri pentru a asigura înlăturarea practic totală a sărurilor solubile (5—10, după raportul dintre cantitatea de săruri din probă și cantitatea de apă distilată folosită la fiecare culegere), se verifică inexistența sării în ultima apă de culegere (dacă nu formează un precipitat alb-gălbui de ClAg la contactul cu o picătură de AgNO_3). Pentru evitarea oricărui risc de pierdere, în caz de spălare insuficientă, se recomandă efectuarea acestei probe pe o lamă de sticlă cu o singură picătură din ultima apă de spălare sau, preferabil, cu o fracțiune de picătură normală, pusă pe lamă cu o micropipetă. După verificare, se colectează apele anterioare de culegere a sărurilor, se determină volumul total și se dozează sarea conținută într-o porțiune de 10 cm^3 de exemplu, din acest volum total, pentru a păstra restul pentru contraprobe eventuale.

Cantitatea de 10 cm^3 se titrează volumetric, determinînd cantitatea de soluție $\frac{N}{100}$ sau

$N/10$, de AgNO_3 , necesară pentru a provoca precipitarea integrală a ionului Cl^+ din probă sub formă de precipitat alb-gălbui, cazeos, de AgCl . Epuizarea soluției în ioni Cl^+ este determinată de colorarea în roșu-vișiniu stabil a acestei soluții căreia i se adăugase în prealabil, în acest scop, cîteva picături de soluție diluată (de exemplu 1 %) de KCrO_4 .

În cazul cînd proba conține cantități mici de sare, este necesar să se analizeze o cantitate mai mare decât 10 cm^3 , folosind soluție de AgNO_3 de titru mai diluat, de exemplu $N/100$.

Pentru această situație, N. P. Butorin recomandă folosirea unei soluții de AgNO_3 cu concentrația de 1,0311 g/l, din care un centimetru cub corespunde unui miligram de Cl_2 . Dacă cantitatea de soluție de probă se diluează la 100 cm^3 , se adaugă un centimetru cub de soluție 1 % KCrO_4 corecția care trebuie adusă cantității de soluție de AgNO_3 , aparent consumată pentru reacție, este cea dată în tabela 11.

Tabela 11. A — cantitatea de soluție de AgNO_3 , consumată, în cm^3 (1,0311 g/l); B — corecția necesară de adus valorii A, în cm^3

A	B	A	B	A	B
0,2	-0,20	0,8	-0,39	5,0	-0,50
0,3	-0,25	0,9	-0,40	6,0	-0,52
0,4	-0,30	1,0	-0,41	7,0	-0,54
0,5	-0,33	2,0	-0,44	8,0	-0,56
0,6	-0,36	3,0	-0,46	9,0	-0,58
0,7	-0,38	4,0	-0,48	10,0	-0,60

I. Observație.

Soluția $\frac{N}{10}$ NaCl conține 5,8453 g NaCl la litru

Soluția $\frac{N}{100}$ NaCl conține 0,58453 g NaCl la litru

Soluția $\frac{N}{10}$ AgNO_3 conține 16,988 g AgNO_3 la litru

Soluția $\frac{N}{100}$ AgNO_3 conține 1,6988 g AgNO_3 la litru

II. Observație. Concentrația 1,0311 g AgNO_3 la litru corespunde dozajului unei cantități de un miligram Cl_2 la un centimetru cub de soluție AgNO_3 consumat, indiferent de cationii soluției de cloruri.

Lucrul cu această concentrație permite determinarea directă a concentrației în clor, indiferent dacă roca analizată conține numai NaCl sau și MgCl_2 sau CaCl_2 .

Pentru calculul volumului ocupat de cristalele de sare în porii probei, în timpul determinării, se împarte greutatea sării dozate prin greutatea specifică a sării geme pure (2,164 g pe cm^3), respectiv a sării mixte efectiv prezente (care poate fi calculată pe baza greutăților specifice: 2,152 pentru CaCl_2 ; 2,320 pentru MgCl_2).

Dată fiind valoarea în general redusă a corecției de porozitate pentru volumul sărurilor solide, cum și datorită faptului că mai toate sărurile prezente au greutatea specifică de ordinul 2,15—2,40 se calculează de obicei această corecție în ipoteza prezenței exclusive a sării geme.

7. Determinarea conținutului în carbonați al probelor. Carbonații conținuți de rocile colectoare de țitei pot fi: FeCO_3 , Na_2CO_3 , K_2CO_3 , MnCO_3 , dar mai ales CaCO_3 și ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$). Prezența lor în rocă are o importanță deosebită, deoarece ei pot fi dizolvați printr-un tratament la acidizare (v. cap. XV), lăsând în urma lor noi canale de drenaj în rocă și sporind, astfel, considerabil permeabilitatea acestora.

Conținutul în carbonați al rocilor colectoare poate să varieze de la 90 % și mai mult, în cazul calcarelor sau al dolomitelor, până la zero. Valorile care prezintă importanță maximă se situează între 40 % și 10 % *). Valorile mai

*) Ceea ce nu exclude tratamentul citat, în cazul calcarelor și dolomitelor cu conținut mare de carbonați, caz în care tratamentul lucrează pe cale oarecum diferită (lărgirea micro-fisurilor) v. și *intensificarea fluxului sondelor, Cap XV.

mari decât circa 40 % necesită un consum specific exagerat de acid pentru o rază de pătrundere eficientă.

Valorile mai mici decât circa 10 % provoacă, în general, o mărire a permeabilității, care are o importanță economică redusă. Limitele indicate, departe de a fi rigide, sînt strict indicative și depind de mulți factori, în special de structura rocii și de modul de distribuție a carbonaților (în granule sau în liant).

Pentru dozarea carbonaților din rocile colectoare, se folosesc următoarele metode:

a) *Metoda indirectă.* Dozarea cantității de acid clorhidric consumat în reacție de deplasarea anhidridei carbonice.

Se cîntărește o probă cu greutatea G de circa 2 g, se introduce într-un balon cotat cu capacitatea de 500 cm^3 , împreună cu 50 cm^3

HCl $\frac{N}{10}$ (conținînd 3,646 g HCl la litru) și

se completează cu apă distilată, pînă la circa 400 cm^3 . După terminarea descompunerii carbonatului de calciu, la rece sau după o ușoară încălzire la 35°—40°C, se încălzește conținutul balonului pînă la fierbere, timp de 15—20 minute după care degajarea de CO_2 prin descompunerea carbonatului de magneziu încetează. Se răcește și se completează cu apă distilată, la 500 cm^3 , lăsînd să decanteze. Din soluția decantată se ia cu o pipetă 100 cm^3 (corespunzînd cu 1/10 din cantitatea de acid introdusă și se titrează HCl rămas cu soluție

$\frac{N}{10}$ de NaOH (conținînd 4,0005 g NaOH la litru) în prezență de metiloranj, ca indicator, pînă la virajul permanent în galben-deschis.

Dacă a este numărul de cm^3 de soluție $\frac{N}{10}$ NaOH consumată, în ipoteza că nu există alți carbonați decât carbonat de calciu, procentajul ponderal în carbonat de calciu al probei este:

$$k = \frac{2,502 - 0,5004 a}{G} \cdot 100 \%$$

unde G este greutatea probei, în g.

Metoda este destul de ușoară și de exactă, însă în unele probe de rocă nu tot acidul consumat în reacție este consumat de reacția cu CaCO_3 , iar reacțiile secundare scapă controlului, falsificîndu-se rezultatul (rezultă conținutul în CaCO_3 mai mari decât cele reale).

b) *Metode directe,* prin dozarea ponderală a anhidridei carbonice rezultate din reacția de descompunere.

1) Se întrebuițează circa 1—2 g de probă spălată, extrasă și uscată în etuvă la 107° pînă la greutate constantă într-un creuzet și apoi se calcinează la roșu-viu (800°—900°C) pînă la greutate constantă. Încălzirea se face în creuzet deschis, iar prezența de CO_2 în flacăra reduce viteza disocierii, astfel încît

încălzirea indirectă în cuptor cu mufă, moderat ventilat nu durează mai mult decât încălzirea directă pe flacără (afară de cazul când se folosește flacără de hidrogen).

Diferența de greutate a , în g, raportată la greutatea G , în g, a probei, determină procentul de carbonat:

$$k = \frac{178,6 \cdot a}{G}$$

2) Se cântărește circa 1–2 g probă spălată extrasă și uscată în etuvă la 107° pînă la greutate constantă într-o nacelă de porțelan și se introduce într-un tub orizontal de sticlă greu fuzibilă, în care se circulă cu viteză moderată (circa 2 cm³/s) aer uscat prin trecerea prealabilă printr-un tub cu CaCl₂. Aerul ieșit din tubul cu proba este răcit, uscat prin trecere peste CaCl₂ și peste MgCl₂ și apoi este trecut printr-un tub cu calce sodată care absoarbe anhidrida carbonică rezultată; sporul de greutate, după experiență, al tubului cu calce sodată reprezintă greutatea anhidridei carbonice, a , în g, care dă $k = 178,6$ a/G.

Prin verificarea greutății tubului cu calce sodată se pot urmări mersul și terminarea reacției, însă se recomandă ca verificarea să nu se facă decît după terminarea reacției, spre a evita pierderile.

Prin urmărirea bilanțului ponderal (sporul de greutate al tuburilor uscătoare plus sporul de greutate al tubului absorbant de CO₂ trebuie să egaleze pierderea de greutate a probei) se pot obține date care permit să se corecteze eventual saturația în apă, în cazul când aceasta a fost determinată la cald, prin pierderea de greutate a probei sau a absorbției apei degajate, datorită efectului de pierdere a apei de cristalizare sau și de adsorbție pe care îl prezintă uneori unele elemente minerale ale probei.

Această metodă este una dintre cele mai exacte, dar are o aplicație practică greoaie, din cauza volumului de lucrări.

3) Se cântărește împreună, dar nu în contact, într-un aparat adecvat construit: proba de rocă o cantitate de acid clorhidric suficientă pentru a reacționa cu toți carbonații din rocă, și o cantitate de absorbant de vapori de apă, suficientă pentru a absorbi toți vaporii de apă rezultați din reacție.

Se provoacă reacția și, după înlăturarea integrală din aparat a anhidridei carbonice, se cântărește ansamblul. Pierderea de greutate a , în g, a probei cu greutate inițială de G , în g., dă procentul de carbonați k , (echivalent CaCO₃) adică:

$$k = 178,6 \cdot a/G.$$

În R.P.R., această metodă este folosită curent, cu aparatul reprezentat în fig. 43. După încărcarea vasului 4 cu HCl pentru reacție și a vaselor 7 și 8 cu H₂SO₄ concentrat, pentru uscare, se cântărește aparatul

întîi fără probă și apoi cu proba. Prin deschiderea treptată a robinetului 5, se provoacă reacția, la început cu puțin acid și la rece, iar apoi cu exces de acid și încălzind la circa 60°. După încetarea reacției (încetarea barbotajului în vasul 8), se răcește aparatul și se înlocuiește anhidrida carbonică din aparat cu aer, prin deschiderea dopului 2. Pierderea de greutate constatată între a doua și a treia cîntărire este egală cu greutatea anhidridei carbonice evacuate. Conținutul în carbonați este, păstrînd aceleași notații, $k = 178,6$ a/G.

4) Se culege anhidrida carbonică rezultată din reacția cu acid clorhidric a unei cantități cunoscute de probă. Se măsoară volumul acesteia la presiunea atmosferică și la temperatura camerei. Se calculează volumul V , în cm³, ocupat de aceeași cantitate de anhidridă carbonică la 760 mm col. Hg și la 0°C și se determină conținutul în carbonați (exprimat în CaCO₃)

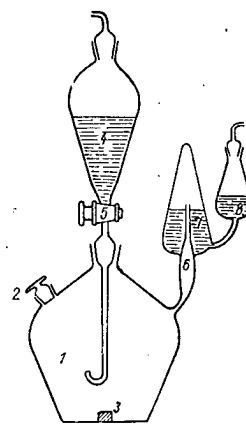


Fig. 43. Aparat pentru determinarea directă a greutății anhidridei carbonice provenite din carbonații probei: 1 — recipient pentru probă; 2 — dop pentru introducerea probei și pentru eliminarea parțială a anhidridei carbonice; 3 — proba; 4 — vas de alimentare cu acid clorhidric; 5 — robinet; 6 — decantor; 7 — vas cu acid sulfuric concentrat; 8 — barbotor de uscare cu acid sulfuric concentrat.

$$k = 0,4494 \frac{V}{G},$$

unde G este greutatea probei inițiale, spălată, extrasă și uscată la 107°, pînă la greutate constantă.

Una dintre cele mai exacte și totuși expeditivă, ca analiză volumetrică, metoda este aplicată cu oarecari variante. Avdusin și Baturin recomandă aparatul reprezentat în fig. 44: un flacon G cu capacitatea de circa 30 sau 50 litri, cu fundul tăiat și rezemat ca în fig. 44, constituie un volant termic care face practic inutilă folosirea unui termostat.

Balonul A conține proba de circa 0,5–5 g, spălată, extrasă și uscată; fiola B, deschisă, în formă de lingură, conține 5–6 cm³ de acid clorhidric concentrat (40–50%); tubul C semicapilar, cu lungime suficientă pentru a asigura răcirea gazelor rezultate din reacție, comunică cu biureta E, formată din două secțiuni cu diametru diferit (ca în fig. 44), dar cu capacitate aproximativ egală. Biureta E, deschisă la partea inferioară, este continuă în tubul D, care comunică printr-un tub cu flaconul F.

Pentru analiză, vasul G și flaconul F se umplu cu soluție saturată de NaCl care, datorită depozitării, are temperatura camerei; prin deschiderea robinetului flaconului F, se umple aproape complet secțiunea inferioară a biuretei

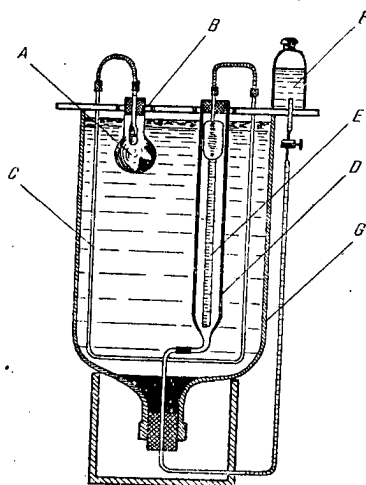


Fig. 44. Aparat pentru dozarea volumetrică a anhidridei carbonice provenite din carbonații probei: A — vas de reacție; B — fiola cu probă; C — semicapilar lung pentru uniformizarea temperaturii; D — tub pentru reglarea presiunii; E — biureta de dozare volumetrică a volumului de aer deplasat de anhidridă carbonică; F — flacon pentru reglarea nivelului și a presiunii în biureta E; G — baie de apă — volan termic.

E, notindu-se nivelul care trebuie să fie la aceeași înălțime în vasele E și D. Se înclină balonul A și fiola B pentru ca acidul să curgă pe rocă dintr-o dată, pentru a asigura local o creștere a temperaturii suficientă pentru reacția cu $MgCO_3$.

Volumul de anhidridă carbonică degajat deplasează, prin tubul C către limita E, un volum

egal de aer conținut în aparat (pentru reducerea erorilor, volumul sistemului A + C trebuie să nu fie prea mare, iar lungimea tubului C trebuie să fie cât mai mare, pentru a asigura schimbul de căldură; în realitate, el nu are forma simplă reprezentată în fig. 44 pentru a ușura urmărirea acestora, ci este înfășurat în spirală). Prin această deplasare, nivelul în E se coboară. Pentru a asigura măsurarea la aceeași presiune a volumului de gaze rezultat din reacție, este necesar ca, prin deschiderea robinetului flaconului F și prin denivelarea acestuia, să se aducă meniscul lichidului din vasul D la același nivel cu meniscul din biureta E în noua poziție. Dacă temperatura este constantă, înainte și după probă, sporul de volum generat prin coborîrea nivelului meniscului în biureta E reprezintă volumul (la presiunea și la temperatura analizei) anhidridei carbonice rezultate din reacție. Pentru determinarea directă a greutății acestui volum de CO_2 , se poate folosi tabela 12, care dă greutatea unui centimetru cub de CO_2 , în funcție de presiunea barometrică exprimată în mm col. Hg și de temperatură, exprimată în $^{\circ}C$.

În acest caz, γ fiind greutatea specifică citită în tabela 12, în mg/cm^3 , a anhidridei carbonice, V — volumul citit prin deplasarea meniscului în E, la temperatura și la presiunea analizei, în cm^3 , și G — greutatea inițială, în g, a probei, spălate, extrase și uscate, conținutul procentual de carbonați (exprimat în $CaCO_3$) al probei este:

$$k = 0,2272 \frac{V \cdot \gamma}{G}$$

8. Compresibilitatea rocilor colectoare. Compresibilitatea rocilor colectoare este raportul dintre variația de volum brut a rocii datorită variației presiunii cu o atmosferă, pe de o parte, și volumul brut al rocii, pe de

Tabela 12. Greutatea în miligrame a unui centimetru cub de CO_2 , în funcție de presiunea exprimată în mm col. Hg și în funcție de temperatura exprimată în $^{\circ}C$

P to	742	744,5	747	749	751	753,5	756	758	760	762,5	765	767	769	771
28	1,778	1,784	1,791	1,797	1,804	1,810	1,817	1,823	1,828	1,833	1,837	1,842	1,847	1,852
27	1,784	1,790	1,797	1,803	1,810	1,816	1,823	1,829	1,834	1,839	1,843	1,848	1,853	1,858
26	1,791	1,797	1,803	1,809	1,816	1,822	1,829	1,836	1,842	1,847	1,852	1,856	1,861	1,866
25	1,797	1,803	1,810	1,816	1,823	1,829	1,836	1,842	1,848	1,853	1,858	1,862	1,867	1,872
24	1,803	1,809	1,816	1,822	1,829	1,835	1,842	1,848	1,853	1,858	1,862	1,867	1,872	1,877
23	1,809	1,815	1,822	1,828	1,835	1,841	1,848	1,854	1,859	1,866	1,868	1,873	1,878	1,883
22	1,815	1,821	1,828	1,834	1,841	1,847	1,854	1,860	1,865	1,870	1,875	1,880	1,885	1,890
21	1,822	1,828	1,835	1,841	1,848	1,854	1,861	1,867	1,872	1,877	1,882	1,887	1,892	1,897
20	1,828	1,834	1,841	1,847	1,854	1,860	1,867	1,873	1,878	1,883	1,888	1,893	1,898	1,903
19	1,834	1,840	1,847	1,853	1,860	1,866	1,873	1,879	1,884	1,889	1,894	1,899	1,904	1,909
18	1,840	1,846	1,853	1,859	1,866	1,872	1,879	1,885	1,890	1,895	1,900	1,905	1,910	1,915
17	1,846	1,853	1,860	1,866	1,873	1,879	1,886	1,892	1,897	1,902	1,907	1,912	1,917	1,922
16	1,853	1,860	1,866	1,873	1,879	1,886	1,892	1,898	1,903	1,908	1,913	1,918	1,923	1,928
15	1,859	1,866	1,872	1,879	1,886	1,892	1,899	1,905	1,910	1,915	1,920	1,925	1,930	1,935
14	1,865	1,872	1,878	1,885	1,892	1,899	1,906	1,912	1,917	1,922	1,927	1,932	1,937	1,942
13	1,872	1,878	1,885	1,892	1,899	1,906	1,913	1,919	1,924	1,929	1,934	1,939	1,944	1,949
12	1,878	1,885	1,892	1,899	1,906	1,912	1,919	1,925	1,930	1,935	1,940	1,945	1,950	1,955
11	1,885	1,892	1,899	1,906	1,913	1,919	1,926	1,932	1,937	1,942	1,947	1,952	1,957	1,962
10	1,892	1,899	1,906	1,913	1,920	1,926	1,933	1,939	1,944	1,949	1,954	1,959	1,964	1,969

altă parte. În conformitate cu această definiție,

$$\beta = \frac{\partial V}{\partial P} \cdot \frac{1}{V} \quad (42)$$

unde:

β este coeficientul de compresibilitate, în cm^2/kg ;

∂V — variația de volum brut a unei probe de volum brut V , ambele volume fiind exprimate în oricare, aceleași, unități de volum;

∂P — variația de presiune care produce variația de volum ∂V , în kg/cm^2 .

În cea mai generală formă a legii de variație a volumului, β este funcție de presiune și de temperatură definită de relația (42) și de funcția $f(P, V, T) = 0$, a rocii respective.

Admițând și pentru rocile colectoare, pentru $f(P, V, T) = 0$, o lege cu forma:

$$V_{tp} = V_0 [1 + \alpha(t - t_0)] e^{-aP} \cdot P^{-b} \quad (43)$$

unde:

V_{tp} este volumul la temperatura t și la presiunea p , al unei porțiuni de rocă, care la temperatura $t_0 = 0^\circ\text{C}$ și la presiunea absolută 1 ata are un volum V_0 , ambele volume fiind exprimate în oricare, aceleași, unități de volum;

α — coeficientul de dilatare termică pentru volum al rocii examinate, practic egal cu media ponderată cu conținutul procentual în volum, a coeficienților corespunzători de dilatare termică ai elementelor minerale componente ale rocii;

P — presiunea la care este supusă roca, în kg/cm^2 ;

a și b — coeficienți de comportare la deformarea elastică, specifici rocii, se obține, conform definiției (42), și la temperatură constanță:

$$\beta = -a - \frac{b_0}{P} \quad (44)$$

Deoarece exponentul b are valori absolute foarte mici la solide și la lichide, el este neglijat de obicei, în special, la presiunile mari la care valoarea absolută a raportului $\frac{b}{P}$ devine

practic neglijabilă chiar în comparație cu a care și el este foarte mic. Cu această aproximație și la temperatură constantă, legea de variație a volumului rocilor colectoare cu presiunea se folosește în forma

$$V_p = V_0 e^{-\beta P} \quad (45)$$

unde V_p este volumul la presiunea P al unei probe de rocă, care la presiunea de 1 ata are un volum V_0 , ambele volume fiind exprimate în oricare aceleași unități.

Cu această aproximație și în scara de presiuni de la 0 la 200 ata, grăsiile petrolifere au β între $-1,2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$ și $-2,0 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$, valorile absolute mici ale lui β corespund presiunilor mari, iar cele mari, presiunilor mici. În lipsă de date experimentale pentru roca studiată, se recomandă să se ia $\beta \approx -1,4 \dots 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$. Semnul minus se explică prin faptul că unei creșteri a presiunii exercitate asupra rocii îi corespunde o descreștere a volumului acesteia.

Pentru nisipurile slab consolidate, β prezintă valori absolute mai mari și mai variate. Pentru calcarele compacte, β prezintă valori absolute, foarte mici, în general neglijabile pentru problemele de zăcămint.

Din cauza lipsei relative de date experimentale și a greutății de a le obține, s-a propus ca β să fie apreciat prin proporționalitate inversă între β și coeficientul de elasticitate mediu E al elementelor minerale care compun roca, în comparație cu o rocă cu β și cu E cunoscute.

Acest procedeu are o valoare de orientare, deoarece compresia (respectiv decompresia) rocii are loc în zăcămint la presiuni care acționează din toate direcțiile, pe cînd E se măsoară la compresie după o singură direcție, iar relația:

$$\beta = \frac{3(1 - 2\mu)}{E}, \quad (46)$$

în care μ este coeficientul de contracție transversală al lui Poisson, valabilă pentru corpuri compacte, nu poate fi aplicată, deoarece reducerea volumului rocilor este consecința apropiării între ele a granulelor minerale care se reazemă unele pe altele pe suprafețe relative reduse, în comparație cu suprafața lor totală, ceea ce apropie situația de aceea a compresiei după o singură direcție. Cauza principală de neexactitate a proporționalității propuse constă însă tocmai în modificarea condițiilor de rezemare reciprocă a granulelor cu variația presiunii, procentul de suprafață în contact din suprafața lor totală crescînd reversibil cu presiunea, în urma deformațiilor elastice ale granulelor, și ireversibil, în urma deformațiilor permanente (în general, sfărîmarea).

Cunoașterea compresibilității rocilor colectoare prezintă o importanță specială pentru studiul bilanțului energetic de zăcămint, în cazul zăcămintelor sărace în alte resurse de energie, în special în cazul zăcămintelor cu regim elastic cu împingere de apă. Energia de dezlocuire a fluidului din pori, fiind egală cu suma produselor dintre variația elementară a volumului de pori și presiunea respectivă de dezlocuire, poate fi calculată cu:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial P} dP = \beta V \cdot dP, \quad (47)$$

și

$$N_{1,2} = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV = \int_{P_1}^{P_2} P \cdot V \cdot \beta \cdot dP, \quad (48)$$

unde: V este volumul rocii (V_1 în starea inițială, V_2 în cea finală) în cm^3 ;

P — presiunea care solicită roca (P_1 în starea inițială, P_2 în cea finală);

β — coeficientul de compresibilitate al rocii, în cazul general, funcție de P , [cf. (44)];

$N_{1,2}$ — lucrul mecanic de dezlocuire furnizat de rocă prin decompresiune.

Pe de altă parte, dacă se ține seama de faptul că variația volumului brut al rocii este egală cu variația de volum a granulelor plus variația de volum a porilor și de faptul că prima este neglijabilă în comparație cu a doua, se ajunge la concluzia că variația volumului brut al rocii este practic egală cu variația volumului porilor, adică cu volumul de fluid dezlocuit, și se poate introduce noțiunea convențională de coeficient de compresibilitate al spațiului de pori al rocii, care este

$$\beta' = \frac{\partial V_g}{\partial P} \frac{1}{V_g} \quad (49)$$

unde: V_g este volumul spațiilor goale din rocă $= V \cdot m$;

∂V_g — variația volumului spațiilor goale $= dV =$ variația volumului brut al rocii;

m — coeficientul de porozitate al roci $= \frac{V_g}{V}$;

astfel încît

$$\beta' = \frac{1}{m} \beta. \quad (50)$$

Se observă că în cazul rocilor cu porozitate foarte mică, β' poate fi mult mai mare decât β și, deci, variația relativă a volumului spațiilor goale din zăcămint poate fi mult mai mare, ceea ce este de natură a spori mult randamentul operației de golire a zăcămintului prin decompresiune elastică.

În realitate, randamentul de golire (coeficientul de extracție în lichid) este influențat în același mod, în paralel, de coeficientul de compresibilitate al lichidului din pori (v. Cap. IV B.a.2., B.b.3., B.d. și, în particular, indirect, pentru țițeiuri, B.d.2.a), fig. 153), astfel încît coeficientul introdus efectiv în calcule este totdeauna un coeficient combinat, care cuprinde ambii coeficienți de compresibilitate, adică β^* ; astfel

$$\beta^* = m\beta_l + \beta_r \quad (51)$$

unde: β^* este coeficientul de compresibilitate combinat (al rocii);

β_l — coeficientul de compresibilitate al lichidului;

β_r — coeficientul de compresibilitate al rocii;

raportați la volumul brut al rocii

(A se vedea și Cap. II).

În cazul rocilor-magazin saturate parțial și cu gaze libere și, în oarecare măsură, în cazul rocilor saturate cu țiței care conține mari cantități de gaze în soluție, deci foarte compresibil în comparație cu roca, cunoașterea exactă a compresibilității rocii pierde din importanță, deoarece β_r rămîne mic față de β_l care, în acest caz, trebuie extins nu numai la lichid, ci la eventualul amestec de gaz și de lichid.

9. Proprietățile electrice și magnetice ale rocilor colectoare și ale rocilor de etanșare învecinate. Proprietățile electrice și magnetice ale rocilor colectoare și ale rocilor de etanșare (învecinate) sînt implicate la analiza diagramelor de carotaj electric pentru stabilirea indirectă a naturii rocilor și a unora dintre parametrii lor fizici, la determinarea înclinării straturilor prin metode electrice și electromagnetice, la determinarea orientării înclinării găurilor de sondă și la determinarea saturațiilor carotelor supuse în laborator proceselor de deplețiune sau de dezlocuire cu fluide.

a) **Rezistivitatea electrică.** Rezistivitatea electrică a rocilor naturale din scoarță întîlnite în sondajele pentru petrol și pentru gaze este rezistența electrică opusă de ele scurgerii curentului între cele două fețe opuse ale unui cub cu latura de un metru. Ea variază între limite largi, de la cîțiva ohmi \times metri pînă la cîteva milioane de ohmi \times metri. În fig. 45 sînt reprezentate gamele de variație ale rezistivității rocilor în stare naturală. În tabela 13 sînt date limitele de variație ale unor componenți minerali ai acestor roci în stare relativ pură.

Tabela 13. Rezistivitatea electrică a unor componenți minerali ai rocilor colectoare și ai rocilor învecinate: ρ , în ohmi \cdot m

Anhidrit	10^7 — 10^{10}
Cuarț	$1,2 \cdot 10^{12}$ — $3,2 \cdot 10^{14}$
Calcit	$5 \cdot 10^7$ — $5 \cdot 10^{12}$
Feldspai	10^{11} — 10^{12}
Grafit	$1,2 \cdot 10^{-6}$ — $3 \cdot 10^{-4}$
Limonit	10^6 — 10^8
Mice colorate	10^{14} — 10^{15}
Muscovit	10^{11} — 10^{12}
Pirroluzit	1 — 10
Sare gemă (~ pură)	$5 \cdot 10^{14}$ — 10^{15}
Țiței	10^9 — 10^{16}

Conductibilitatea electrică a rocilor este în parte electronică, în parte ionică. Cea electronică, datorită elementelor minerale ale rocii, depinde de natura, de cantitatea și de

așezarea acestora în rocă, iar cea ionică depinde de porozitatea rocii, de saturația ei cu apă, de concentrația acestora și de natura sărurilor dizolvate.

Dacă roca conține un component mineral cu conductibilitate mult superioară celorlalți,

Din cele reprezentate în fig. 46 rezultă că, în gama de conținuturi fracționale mici în care astfel de minerale se găsesc în rocile colectoare și în rocile învecinate, influența mineralului conductor asupra rezistivității rocii este foarte redusă. O excepție la această relație

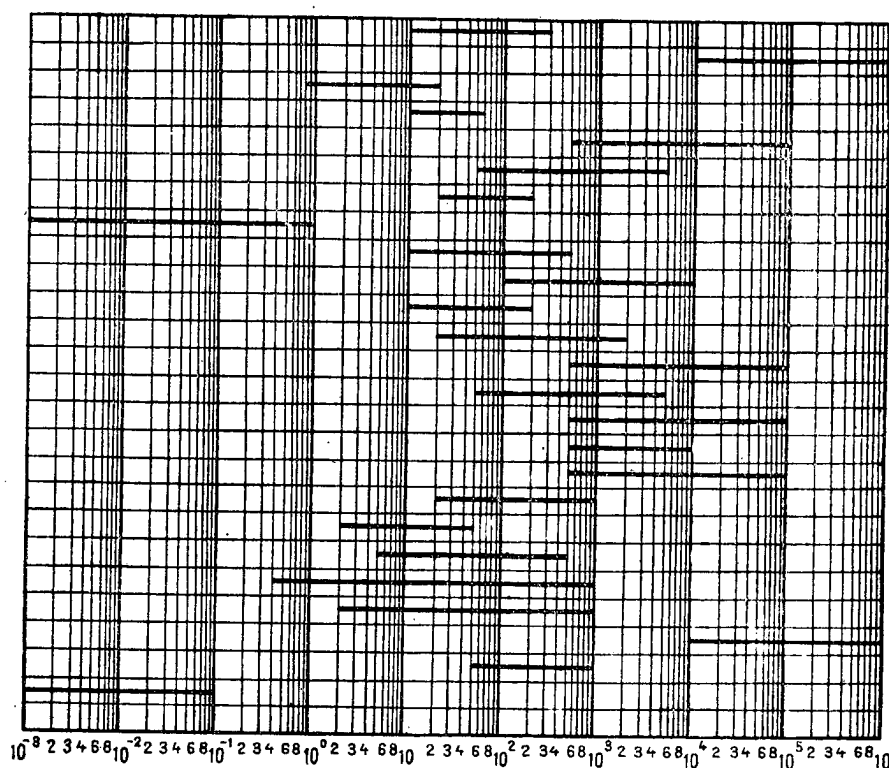


Fig. 45. Rezistivitățile electrice (game) ale principalelor roci colectoare și ale rocilor învecinate, în stare naturală: 1 — anhidrite; 2 — aleurolite; 3 — bazalte; 4 — gabbrouri; 5 — argile; 6 — argile cu carbonași; 7 — gneissuri; 8 — granite; 9 — diabaze; 10 — dolomite; 11 — calcare poroase; 12 — calcare compacte; 13 — conglomerate; 14 — marne; 15 — nisipuri; 16 — gresii poroase; 17 — gresii compacte; 18 — gresii și nisipuri petrolifere și gazeifere; 19 — șisturi argiloase; 20 — sare gemă; 21 — antraciți; 22 — hule slabe; 23 — hule grase; 24 — cărbuni bruni.

influența lui asupra rezistivității rocii este neglijabilă atît timp cît conținutul fracțional al rocii în acel component este redus, astfel încît ei alcătuiește o dispersie discontinuă. Prin creșterea conținutului fracțional în acel element peste o anumită limită (de ordinul a câteva zeci de procente), din ce în ce mai multe elemente izolate din acel component ajung în contact unele cu altele, influențînd sensibil rezistivitatea rocii.

În fig. 46 este reprezentată variația (media statistică) raportului dintre rezistivitatea rocii și aceea a elementului conductor, în funcție de conținutul fracțional în acesta, în cazul unei diferențe foarte mari dintre rezistivitatea rocii ($\sim 10^{-12}$ ohm·m) și aceea a mineralului conductor ($\sim 10^{-3}$ ohm·m).

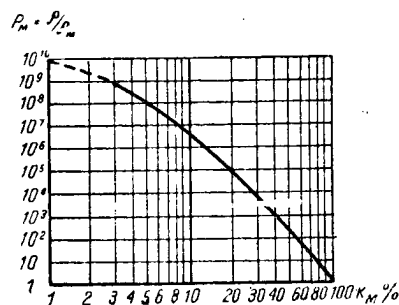


Fig. 46. Variația raportului dintre rezistivitatea rocii și aceea a elementului conductor, P_M , în funcție de conținutul fracțional de component conductor, k_M .

o constituie unele șisturi filitice-grafitoase, la care condiția de continuitate a elementului conductor este îndeplinită la conținuturi foarte mici; se observă însă, în acest caz, o anizotropie foarte pronunțată, iar rezistivitatea rocii în direcție normală la stratificație rămâne mică, neinfluențată.

Afară de rezistivitatea elementelor minerale componente, rezistivitatea rocilor este influențată în ce privește valoarea medie (independent de direcție) de porozitate, de saturație, de rezistivitatea fluidului saturant, temperatură, de structură și de textură, iar în ce privește valoarea după diferitele direcții, de structura ei.

Valoarea rezistivității medii globale poate fi exprimată în forma:

$$\rho_s = \rho_v \cdot B_g \cdot P_a \cdot P_t \cdot \frac{A_c}{c} P_d, \quad (52)$$

unde:

- ρ_s — rezistivitatea efectivă a rocii;
- ρ — rezistivitatea rocii în stare uscată, saturată cu aer;
- P_v — un factor de corecție pentru influența porozității, adimensional;
- B_g — un factor de corecție pentru influența structurii (și granulometriei), adimensional;
- P_a — un factor de corecție pentru influența saturației cu apă, adimensional;
- P_t — un factor de corecție pentru influența temperaturii, adimensional;
- A_c — un factor de corecție pentru influența compoziției chimice a sărurilor dizolvate în apa care saturează roca, adimensional (practic egal cu concentrația ponderală);
- P_d — un factor de corecție pentru influența stării de dispersie asupra mineralizației și asupra rezistivității apei saturante, adimensional.

1) Influența porozității asupra rezistivității. O rocă sedimentară clastică comună are rezistivitatea aproape independentă de porozitate, când este în stare perfect uscată (fără apă liberă din punct de vedere chimic). În stare naturală, rocile sînt saturate parțial cu electroliți, iar rezistivitatea ρ_v a unei roci omogene din punct de vedere granulometric, saturată total cu un electrolit cu rezistivitatea ρ_0 , este funcție de porozitatea m a rocii, în conformitate cu:

$$\rho_v = \frac{1 + 0,25 \sqrt[3]{1-m}}{1 - \sqrt[3]{(1-m)^2}} \rho_0 = P_v \cdot \rho_0 \quad (53)$$

unde:

- ρ_0 — rezistivitatea electrolitului, în ohm·m;
- ρ_v — rezistivitatea rocii, în ohm·m;
- m — porozitatea rocii, în fracțiune subunitară;
- P_v — coeficientul de reducere, adimensional, rezultat din relația (53).

Curba 1 din fig. 47 reprezintă, după Dahnov, variația conform relației (53) a rezistivității unei astfel de roci fictive.

Rocile reale, a căror uniformitate granulometrică g este inferioară unității prezintă o rezistivitate diferită de cea calculată cu $\rho_v =$

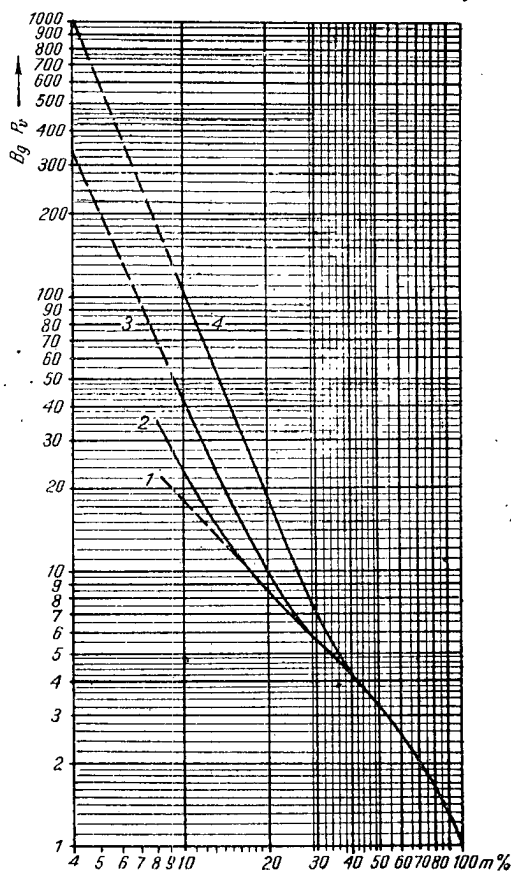


Fig. 47. Variația rezistivității rocilor (în ordonata coeficientului de corecție $B_g \cdot P_v$) saturate complet cu apă, în funcție de porozitatea m : 1 — curbă teoretică pentru o rocă fictivă ($B_g = 1$), calculată cu (53); valoarea probabilă; 2 — curba medie statistică pentru nisipuri și pentru gresii slab cimentate; 3 — curba medie statistică pentru gresii cu grad de cimentare mediu și pentru calcare poroase; 4 — curba medie statistică pentru gresii, calcare și dolomite compacte.

$= P_v \rho_0$, cu un factor de corecție B_g , și anume:

$$\rho_v = B_g \cdot P_v \cdot \rho_0$$

$$g = 1 - \frac{\sum \Delta g_i \cdot \Delta d_i}{d_e} \quad (54)$$

unde:

g este coeficientul de uniformitate granulometrică, fracțiune subunitară (a nu se confunda cu coeficientul de neuniformitate definit la B.b.2.)

- Δg_i — fracțiunea granulometrică ponderală cu diametrul mediu d_i , exprimată ca fracțiune subunitară;
 Δd_i — diferența dintre diametrul d_i al fracțiunii considerate și diametrul: d_e — diametrul mediu al elementelor granulometrice ale rocii.

Natura exactă a funcției $B_g = f(g)$ este insuficient cunoscută; după lucrările Institutului Gubkin, valoarea produsului $B_g \cdot P_v$ poate fi reprezentată ca în fig. 47 (curbele 2, 3 și 4), după gradul de cimentare al rocilor.

Variația produsului $B_g \cdot P_v$ și, deci, a raportului dintre rezistivitățile rocii și ale electrolitului, în funcție de porozitate, poate fi reprezentată, într-o aproximație mai sumară, printr-o relație de forma $B_g P_v \approx 1/m^3$, în care $c \approx 2$.

2) Influența saturației asupra rezistivității. În cazul unei saturații parțiale, rezistivitatea rocii este inferioară celei calculate conform relației (53) și anume, după V. A. Dahnov:

$$\frac{\rho_a}{\rho_v} = P_a = \frac{1}{S_a^{2,15}} \quad (55)$$

în care:

- ρ_a este rezistivitatea efectivă a rocii parțial saturate, în ohm·m;
 ρ_v — rezistivitatea teoretică a rocii complet saturate, în ohm·m;
 S_a — saturația în apă a rocii, fracțiune subunitară.

În cazul rocilor petrolifere și gazeifere, este mai ușoară reprezentarea în funcție de saturați în țiței sau în gaze, iar coeficienții de corecție, în loc de P_a , sînt:

$$P_f = \frac{\rho_f}{\rho_v} \text{ și } P_g = \frac{\rho_g}{\rho_v}. \quad (56)$$

Fig. 48 reprezintă relația dintre P_g , respectiv P_f , respectiv P_a și saturațiile S_g , respectiv S_f , respectiv S_a . Se observă că scăderea conținutului în apă raportat la volumul total de rocă, prin scăderea porozității, are un efect de reducere a rezistivității mult mai puțin importantă decît scăderea conținutului în apă raportat la volumul total al rocii, prin creșterea saturației în țiței, din cauza formării, în acest ultim caz, a unor pelicule izolante cu continuitatea remarcabilă.

Influența minerelizației apei asupra rezistivității rocii a se vedea cap. IV B.b.6.

3) Influența temperaturii asupra rezistivității rocilor. Deoarece rezistivitatea electrică a elementelor minerale solide variază foarte încet cu tempera-

tura, variația rezistivității rocilor este practic neglijabilă. Datorită, însă variației cu temperatura a rezistivității electrolitice, influența temperaturii asupra rezistivității rocilor este simțitoare (vezi cap. IV B. b. 6.) în cazul concentrațiilor mari ale electrolitilor ce saturează roca. În cazul concentrațiilor mici sau moderate, influența temperaturii este, în general neglijabilă.

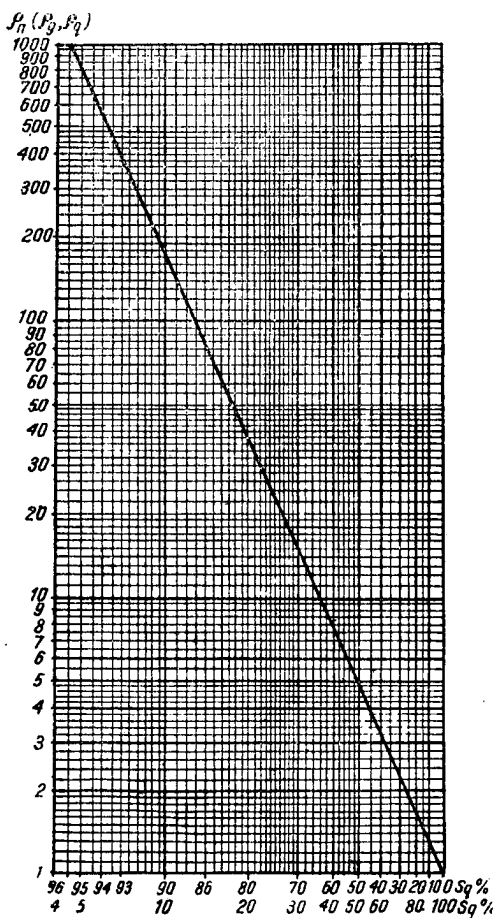


Fig. 48. Variația coeficienților de corecție a rezistivității pentru saturația parțială a rocii P_g , P_f și P_a , în funcție de coeficientul de saturație în fluidul respectiv S_g , S_f și S_a .

4) Influența texturii rocilor asupra rezistivității lor electrice. Anizotropia structurală statistică a rocilor sedimentare determină și anizotropia din punctul de vedere al rezistivității. Într-o rocă formată din intercalații relativ subțiri, cu rezistivitatea ρ_i , într-o rocă de bază cu rezistivitatea ρ_b , rezistivitatea generală a rocii variază cu direcția, fiind totdeauna mai mare

după normala la planele de stratificație decât după direcțiile paralele cu aceste plane. Roca mai apropiată de cele naturale (fig. 49) poate fi redusă, prin însumarea intercalațiilor, într-una simplă (fig. 50). Dacă grosimea totală a stratelor de rocă de bază este de v ori mai mare decât grosimea totală a intercalațiilor, rezultă

$$\rho_t = \frac{(v+1)\rho_b\rho_i}{v\rho_i + \rho_b} \text{ și } \rho_n = \frac{v\rho_b + \rho_i}{v+1}, \quad (57)$$

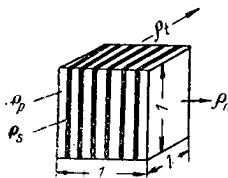


Fig. 49. Reprezentarea schematică a unui cub unitar de rocă electric anizotrop, din cauza intercalațiilor cu rezistivitate ρ_i diferită de aceea a rocii de bază, ρ_b .

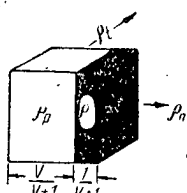


Fig. 50. Reprezentarea schematică a aceluiași cub unitar după contopirea intercalațiilor.

unde ρ_t este rezistivitatea tangențială, după direcții paralele cu stratificația, în ohm·m;
 ρ_n — rezistivitatea normală, după direcția normală la stratificație, în ohm·m.

Coefficientul de anizotropie, din punctul de vedere al rezistivității, este

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} = \sqrt{1 + \frac{v}{(v+1)^2} \cdot \frac{(\rho_b - \rho_i)^2}{\rho_b \cdot \rho_i}} \quad (58)$$

și, deși caracteristic fiecărei roci, este totdeauna pozitiv.

Rezistivitatea medie a rocii este:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n \cdot \rho_t} = \frac{\rho_n}{\lambda} = \lambda \rho_t. \quad (59)$$

Valorile frecvente ale coeficienților de anizotropie ai rocilor sedimentare din zăcămintele de petrol și de gaze și din vecinătatea lor sînt date în tabela 14.

Afară de această microanizotropie, trebuie considerată macroanizotropia marilor pachete de roci constituite din alternanțe de roci, care au fiecare rezistivități și microanizotropia lor.

Tabela 14. Valorile coeficienților de anizotropie și ale raporturilor rezistivităților extreme ale rocilor sedimentare

Roca	λ	$\frac{\rho_n}{\rho_t}$
Argile puțin stratificate ..	1,02—1,05	1,04—1,10
Argile cu intercalații nisip.	1,05—1,115	1,10—1,32
Gresii stratificate	1,10—1,29	1,20—1,65
Argile sistoase	1,10—1,59	1,20—2,65
Șisturi argiloase	1,41—2,25	2,00—5,00
Îuile	1,73—2,35	3,00—6,50
Antraciți	2,00—2,55	4,00—6,50
Șisturi argiloase-grafitoase	2,00—2,75	4,00—7,50

În cazul alternanței a două roci, cu grosimi totale h_1 și h_2 , cu rezistivitățile medii ρ_{m_1} și ρ_{m_2} , notînd $v_{1,2} = h_1/h_2$, coeficientul de macroanizotropie al ansamblului este, analog cu (58):

$$\lambda_M = 1 + \frac{v_{1,2}}{(v_{1,2} + 1)^2} \frac{(\rho_{m_1} - \rho_{m_2})^2}{\rho_{m_1} \cdot \rho_{m_2}} \dots \quad (60)$$

Dacă rezistivitatea tangențială a rocii 1 este ρ_{t_1} și aceea a rocii 2, ρ_{t_2} , rezistivitatea tangențială a ansamblului este

$$\rho_{1,2t} = \frac{(v_{1,2} + 1) \cdot \rho_{t_1} \cdot \rho_{t_2}}{v_{1,2} \cdot \rho_{t_2} + \rho_{t_1}} = \frac{(v_{1,2} + 1) \cdot \rho_{m_1} \cdot \rho_{m_2}}{v_{1,2} \cdot \lambda_1 \rho_{m_2} + \lambda_2 \lambda_2 \rho_{m_1}} \quad (61)$$

unde λ_1 și λ_2 sînt coeficienții de microanizotropie ai rocilor 1, respectiv 2; dacă rezistivitatea după normală a rocii 1 este ρ_{n_1} , și aceea a rocii 2, ρ_{n_2} , rezistivitatea după normală a ansamblului este:

$$\rho_{1,2n} = \frac{v_{1,2} \cdot \rho_{n_1} + \rho_{n_2}}{v_{1,2} + 1} = \frac{v_{1,2} \cdot \lambda_1 \cdot \rho_{n_1} + \lambda_2 \rho_{n_2}}{v_{1,2} + 1} \quad (62)$$

iar coeficientul general de anizotropie este prin definiție,

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{\rho_{1,2n}}{\rho_{1,2t}}}$$

și are valoarea:

$$\lambda_0 = \sqrt{\lambda_1^2 \lambda_2^2 + \frac{\Delta\lambda}{(v_{1,2} + 1)} \left\{ \lambda_1 \left[2 + \frac{v_{1,2}}{\rho_{m_1} \cdot \rho_{m_2}} (\rho_{m_1}^2 + \rho_{m_2}^2) \right] + \Delta\lambda \right\}} \quad (63)$$

sau

$$\lambda_0 = \sqrt{\lambda_1^2 \lambda_2^2 - \frac{v_{1,2} \Delta\lambda}{(v_{1,2} + 1)^2} \left[\lambda_2 \left(2 + \frac{\rho_{m_1}^2 + \rho_{m_2}^2}{\rho_{m_1} \cdot \rho_{m_2}} \right) - \Delta\lambda \right]} \quad (64)$$

unde $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$
 Dacă $\lambda_2 > \lambda_1$ rezultă

$$\lambda_1 \lambda_M < \lambda_0 < \lambda_2 \cdot \lambda_M, \quad (65)$$

iar dacă $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, rezultă

$$\lambda_0 = \lambda \lambda_M, \quad (66)$$

adică numai în cazul cînd cele două roci componente au coeficienți de microanizotropie egali, coeficientul general de anizotropie este egal cu produsul dintre coeficientul de macroanizotropie și cel de microanizotropie. În mod obișnuit, coeficientul general de anizotropie prezintă o valoare medie între produsele respective.

În mod asemănător se poate determina coeficientul general de anizotropie al unei asociații de trei roci sedimentare, tratînd separat un pachet de două roci și apoi ansamblul format din acesta și al treilea etc. Din analiza ecuațiilor (65) și (66) rezultă că cu cît ansamblul considerat cuprinde mai multe roci (și, deci, probabil, mai diferite), cu atît coeficientul general de anizotropie al ansamblului tinde să crească *).

5. Influența structurii rocilor asupra rezistivității lor electrice Rezistivitatea electrică a rocilor sedimentare saturate natural cu apă este influențată și de structura lor. La compoziție mineralogică constantă, rocile sedimentare saturate cu apă dulce prezintă o tendință de scădere a rezistivității cu cît roca are elementele minerale mai mici. Rocile sedimentare saturate cu apă mineralizată prezintă, dimpotrivă, o pronunțată tendință de creștere a rezistivității electrice, pe măsura creșterii fineții elementelor minerale.

Efectul indicat în cazul apei dulci este datorit sporului de conductibilitate al apei dulci saturate prin dizolvarea sensibilă, datorită suprafeței mari, a unei fracțiuni din elementele minerale considerate în mod normal ca insolubile. Acest fenomen este rar observat în natură, datorită faptului că apa saturată are aproape totdeauna o mineralizație suficientă pentru reducerea și pentru mascarea fenomenului. Efectul indicat în cazul apei mineralizate este datorit, în general, scăderii mineralizației apei prin adsorbție pe suprafața specifică mare a rocii fine, a unei părți din electroliții dizolvați. Fenomenul este observat la contactul argilelor și al marnelor argiloase cu nisipuri saturate cu aceeași apă mineralizată: rezistivitatea argilelor și a marnelor este mai mare decît a nisipurilor vecine.

b) *Permeabilitatea dielectrică **)* (constanta dielectrică) a rocilor colectoare și a rocilor învecinate. Permeabilitatea dielectrică a unui mediu este raportul de creștere a capacității unui condensator electric, între armăturile căruia s-a introdus mediul considerat, față de capacitatea lui cu vid între armături. Permeabili-

tatea dielectrică a rocilor sedimentare și a componentelor lor variază între 2 și 80. Ea crește, în general, cu saturația în apă sau în țiței, cum și cu concentrația în săruri.

Permeabilitatea dielectrică a unui lichid, aproximativ egală cu pătratul indicelui de refracție pe care lichidul îl prezintă față de radiațiile cu mare lungime de undă, este influențată de temperatură, în general scăzută, și variază și cu frecvența curentului cu ajutorul căruia este măsurată, abaterile de la valoarea de curent continuu fiind cu atît mai mici, cu cît frecvența este mai mică. Soluțiile apoase ale sărurilor cu amoniu și cu cationi monovalenți prezintă la $+18^\circ\text{C}$ o permeabilitate dielectrică:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + 3,79 \sqrt{C} \quad (67)$$

unde: ε_0 este permeabilitatea dielectrică a solventului (apă);

C — concentrația soluției, în mol/l (globală).

Pentru soluții cu cationi și cu anioni polivalenți, coeficientul 3,79 trebuie corectat în consecință.

Permeabilitățile dielectrice ale principalelor minerale care intră în compoziția rocilor colectoare și a rocilor învecinate, cum și ale fluidelor care saturează în mod natural sau artificial aceste roci, (în laborator, carotele) sînt indicate în tabela 15).

Tabela 15. Permeabilitățile dielectrice ale citorva minerale și fluide care saturează rocile colectoare, în natură sau în laborator

Substanța	Permeabilitate dielectrică
Cuarț	3,8—4
Feldspati	5,2—7,2
Mică	7,0—7,7
Bentonite	6,2—7,5
Sarcopă	5,8
Calcit	9,8
Giobertit	8,1
Rarit	11,4
Parafină	2,1—2,2
Asfalt	2,7
Ozocherită	2,1—2,2
Țiței	2,0—2,2
Apă distilată la 0°	88
Apă distilată la 50°	70
Apă (vapori) la 145°	1,007
Hexan normal	1,87
Oetan normal	1,94
Decan	1,97
Benzen	2,28
Toluen	2,37
Orto-xilen	2,57
Meta-xilen	2,38
Ciclo-hexan	2,06
Tetralină	2,66
Acetonă	21,5
Acetat de amil	4,8
Eter etilic	4,4
Alcool amilic	16,7
Alcool etilic	27,8
Alcool metilic	35,4
Cloroform	4,8
Tetraclorură de carbon	2,23
Sulfură de carbon (lichid)	2,62
Sulfură de carbon (gaz)	1,00290
Azot	1,0006
Hidrogen	1,0002
Heliu	1,00007
Bioxid de carbon	1,0009

*) Relațiile de anizotropie din punctul de vedere al rezistivității electrice prezintă o analogie completă cu relațiile de anizotropie din punctul de vedere al permeabilității la filtrația fluidelor. Relațiile respective pot fi deduse din relațiile (57) (58) prin înlocuirea rezistivităților, ρ cu, inversele permeabilităților, $1/k$.

**) Denumirea, recent introdusă, de «permittivitate» este, încă, relativ puțin cunoscută și folosită.

c) *Activitatea electrochimică a rocilor colectoare și a rocilor învecinate.* Activitatea electrică a rocilor este proprietatea acestora de a genera un câmp electric în mediul în care sînt situate natural. Ea se datorește: 1) unor fenomene fizice, fenomene de difuzie — adsorbție (altădată numite electroosmoză); 2) unor fenomene pur electrochimice (fenomene de oxidare-reducere) și 3) unor fenomene electrocinetice (fenomene de electrofiltrație).

1) *Activitatea de difuzie-adsorbție* are loc la suprafața de contact a doi electroliți cu aceeași concentrație sau cu concentrații diferite, în care predomină trecerea de la soluția concentrată la cea diluată. Transferul de sarcini electrice astfel provocat pricinuește o diferență de potențial de semn corespunzător ionilor cu viteză mai mare. După legea lui Nernst, prin difuzia ionilor unui electrolit binar, total disociat, între două soluții cu concentrațiile C și C_0 , se naște o diferență de potențial:

$$E_d = \frac{RT}{nF} \frac{u-v}{u+v} \ln \frac{C}{C_0} \quad (68)$$

unde: R este constanta universală a gazelor, egală cu $8,313 \text{ J/}^\circ\text{C}\cdot\text{g}$;

T — temperatura absolută, în $^\circ\text{K}$;

n — valența electrolitului disociat;

F — constanta lui Faraday, egală cu $96\,500 \text{ C}$;

u — viteza de difuziune a cationilor, în cm/s ;

v — viteza de difuziune a anionilor în cm/s .

Pentru soluțiile de NaCl , la temperatura de $+20^\circ\text{C}$, ținînd seama de inversa proporționalitate dintre concentrații și rezistivități, ecuația diferenței de potențial de difuzie-adsorbție este:

$$E_d = -11,6 \lg_{10} \frac{\rho_0}{\rho} \quad (69)$$

în care E_d este dat în milivolți, iar ρ_0 și ρ în ohm-metri.

Ecuațiile (68) și (69), valabile pentru soluții în contact liber, nu corespund valorilor potențialelor de difuziune-adsorbție constatate în rocile naturale (cu excepția rocilor cu granulometrie foarte grosolană), nici ca valoare și, deseori, nici ca semn.

De exemplu, la contactul liber a două soluții de NaCl al căror raport de concentrații este de $10/1$, se naște o forță electromotoare de $-11,6$ milivolți. La contactul aceleiași soluții prin intermediul unei diafragme de material argilos, se măsoară efectiv o diferență de potențial de $+30$ milivolți. Alterația se datorește fenomenelor de adsorbție a ionilor la suprafața particulelor solide ale rocii.

Din cercetările făcute de Institutul de geofizică tehnică din Moscova, rezultă că efectul de adsorbție este influențat:

— de compoziția chimico-mineralogică a rocii (atît ca valoare absolută, cît și ca semn);

— de compoziția chimică a soluțiilor în contact care saturează roca și de concentrația lor (diferența de potențial la contactul rocă-electrolit liber scade repede cu creșterea concentrației);

— de coeficientul de saturație a rocii cu soluție (cu cît saturația este mai mică, cu atît diferența de potențial efectiv măsurată se deosebește mai mult de cea determinată prin ecuația potențialului de difuziune);

— de compacitatea rocii (cu cît roca este mai compactă, cu atît diferența de potențial efectiv măsurată se deosebește mai mult de cea determinată prin ecuația potențialului de difuziune);

— de gradul de dispersie mecanică al elementelor rocii (creșterea gradului de dispersie influențează în același sens ca scăderea saturației sau ca creșterea compacității).

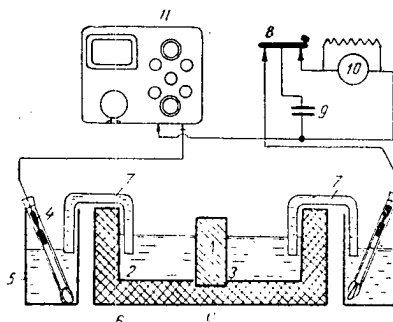


Fig. 51. Schema unei instalații pentru măsurarea diferențelor electrochimice de potențial ale probelor de rocă (de adsorbție-difuzie și de oxidare-reducere): 1 — proba; 2 — compartiment cu soluție de concentrație constantă; 3 — compartiment cu soluție de concentrație variabilă; 4 — electrod nepolarizabil cu calomel; 5 — pahare cu soluție saturată de clorură de potasiu; 6 — recipient de parafină; 7 — sifoane cu agar-agar; 8 — întrerupător; 9 — condensator (utilizat la măsurarea diferențelor de potențial prezentate de rocile cu mare rezistivitate); 10 — galvanometru cu oglindă; 11 — potențiometr.

Afară de influențele pur chimice, se poate trage concluzia de sinteză că activitatea electrică de adsorbție a rocilor crește paralel cu creșterea suprafeței particulelor minerale care vin în contact cu unitatea de volum de electrolit care saturează roca.

În ordinea importanței efectului de adsorbție, rocile colectoare și cele învecinate sînt clasificate astfel: sisturi argiloase, argile sistoase fine abisale, argile batiale, marne compacte, argile nisipoase, gresii argiloase, calcare și dolomite argiloase, gresii slab cimentate, nisipuri fine, nisipuri grosolane și calcare-dolomite poroase. Pe măsura trecerii de la sisturile argiloase către calcare, diferența dintre potențialul de difuziune-adsorbție măsurat scade.

Avînd o deosebită importanță la interpretarea diagramelor de potențial spontan ridicate la carotajul electric al sondelor (potențialul «static») și a profilelor electrice de prospecție, diferența de potențial de difuziune-adsorbție se măsoară cu ajutorul instalației reprezentate în fig. 51.

Pe această cale s-au determinat diferențele de potențial electrochimic prezentate în soluții de KCl de diferite roci tipice din U.R.S.S. (fig. 52).

2) Activitatea de oxidare-reducere are loc în:

— roci cu sulfuri;

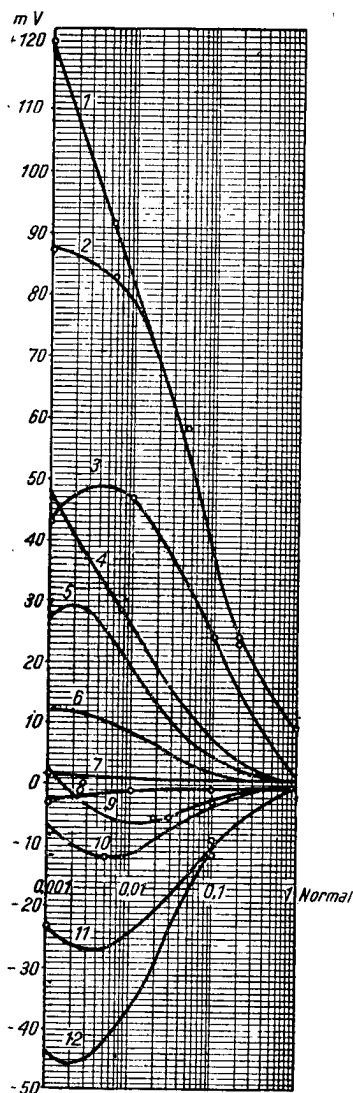


Fig. 52. Potențialele electrochimice, față de soluții de clorură de potasiu de diferite concentrații, ale citorva tipuri de roci colectoare și de roci învecinate din U.R.S.S.: 1 — șisturi argiloase (Urali); 2 — argila de la partea inferioară a strator de Kirmak (șantierul Ordjonikidze); 3 — argila de Crimeea; 4 — calcare; 5 — gresii; 6 — antraciți; 7 — marne; 8 — bauxit; 9 — nisip cuarțos; 10 — dolomit; 11 — nisip feruginos-argilos din bazinul Moscoviei; 12 — caolin.

Observație. În abscisă este reprezentată concentrația soluției de clorură de potasiu, exprimată în funcție de concentrația normală.

— roci cu oxizi metalici în grad de oxidare diferit de acela al oxizilor din rocile învecinate;
— roci carbunoase.

Roca în care are loc procesul de oxidare pierde electroni și capătă sarcini pozitive față de mediu, iar roca în care are loc procesul de reducere se încarcă negativ față de mediu. Marile anomalii de potențial de oxidare-reducere se întâlnesc la prospectarea zăcămintelor, deasupra zonelor cu sulfuri și cu cărbuni.

La zăcămintele în fază incipientă de încarbonizare, în turbării și în mlaștini turboase, predomină în stratele de suprafață procese de oxidare care treptat, cu adîncimea, trec în procese de reducere. În faza următoare, a formării ligniților și a cărbunilor bruni, predomină procesele de reducere pentru ca, după trecerea la huile-antraciți, să predominie iarăși cele de oxidare, care devin maxime în grafit și, în șisturi grafitoase.

Din fig. 53 reiese importanța efectului în rocile carbunoase, în mediu oxidant artificial.

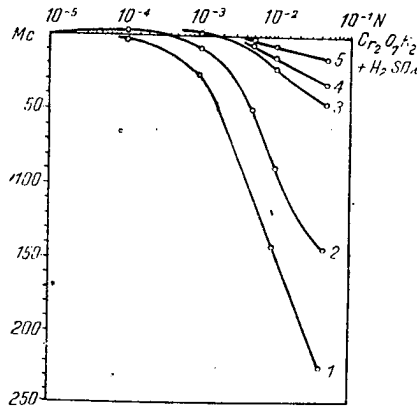


Fig. 53. Variația diferenței de potențial de oxidare-reducere la contactul citorva roci cu un electrolit oxidant artificial ($\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2 + \text{SO}_4\text{H}_2$), în funcție de concentrația acestuia exprimată în fracțiuni de concentrația normală: 1 — antracit; 2 — semiantracit; 3 — cărbune brun; 4 — gresie; 5 — argilă. În ordonată, diferența de potențial, în milivolți.

În rocile colectoare și în cele învecinate, conținutul în sulfuri este mic, dar suficient în general, pentru a produce efecte sensibile. Efectul sulfurilor și al cărbunilor întâlniți în sonde, deși sensibil, este, în general, insuficient pentru a altera simțitor potențialul de adsorbție-difuziune și potențialul electrocinetic (v. vol. I, Carotajul electric).

3) Activitatea electrocinetică. Spre deosebire de 1) și 2), activitatea electrocinetică (de filtrație) are loc nu la contactul electrolitului cu roca, ci în toată masa mediului poros.

Prin distribuția efectului în toată masa rocii, ia naștere un câmp de potențial electric asemănător (cu condiția omogenității și a izotropiei rocii și ale lichidului) cimpului de potențial

hidraulic care îl cauzează. Efectul electrocinetic are următoarele caracteristici:

- crește cu permeabilitatea rocii sau a mediului filtrant (cel puțin în gama permeabilităților reduse), fiind nul la rocile impermeabile, (totuși, efectul nu este reprezentativ din punct de vedere cantitativ pentru permeabilitatea rocilor atinse de sondaje, deoarece efectul măsurat în gaura de sondă este localizat aproape integral în turta de noroi depusă pe fața rocii, turtă a cărei permeabilitate efectivă față de apă este de ordinul a 10^3 — 10^5 ori mai mică decât a unei roci colectoare;)
- scade cu creșterea fracțiunii din spațiul de pori ocupată de lichid imobil;
- este proporțional cu diferența de potențial dată de relația lui Helmholtz;

$$E_H = \frac{\varepsilon \cdot \zeta \cdot \rho_0 \cdot \Delta P}{4\pi\mu}, \quad (70)$$

în care:

- ε — este permeabilitatea dielectrică a lichidului;
- ρ_0 — rezistivitatea electrică a lichidului;
- μ — viscozitatea absolută a lichidului;
- ΔP — diferența de presiune dintre fața de ieșire și fața de intrare a lichidului în rocă;
- E_H — diferența de potențial electric dintre fața de ieșire și fața de intrare a lichidului în rocă;
- ζ — diferența de potențial specifică de la contactul dintre lichidul saturant imobil și cel mobil.

d) *Proprietățile magnetice ale rocilor colectoare.* Proprietățile magnetice (permeabilitate, susceptibilitate, hysteresis) ale rocilor colectoare, care au aplicație preponderentă în cazul orientării magnetice a carotelor și în cazul orientării magnetice a devierii găurii de sondă, sînt expuse în vol. I.

e) *Alte proprietăți fizice și fizico-chimice ale rocilor colectoare ca:* unghiul de contact de echilibru, înălțimea de ascensiune capitală, hysteresis capilar, creșterea de volum prin hidratare parțială etc., sînt expuse în capitolele care tratează despre fenomenele respective, influențate de aceste proprietăți.

c. Influența reciprocă a diferiților parametri ai rocii colectoare

1. *Influența porozității asupra densității și a densității asupra porozității.* Ținînd seama de greutatea specifică aparentă a rocii, γ_a mai mică decât γ_m , greutatea specifică a elementelor solide care alcătuiesc roca, din relația $\gamma_a = \gamma_m (1 - m)$ rezultă relația (71), folosită și pentru determinarea porozității,

$$m = 1 - \frac{\gamma_a}{\gamma_m}, \quad (71)$$

foarte utilă pentru determinări curente, dar care necesită o măsurare foarte precisă a greutăților specifice γ_a și γ_m , în cazul rocilor compacte.

Densitatea de așezare a elementelor rocii variază în sens invers cu porozitatea și influențează: α) prin distanța dintre elemente, în special în cazul rocilor necimentate sau slab cimentate și β) prin gradul de umplere cu elemente mici, a golurilor lăsate între ele de elementele mari.

α) Distanța dintre elemente, a , (fig. 54), sporește porozitatea rocii. În cazul rocii fictive, cu elemente sferice așezate în rețea romboedrică, variația porozității datorită sporirii distanței dintre elemente este dată de relația:

$$m = 1 - 0,74 \left(\frac{D}{D + a} \right)^3. \quad (72)$$

În cazul rocii fictive, cu așezare în rețea cubică (fig. 55) relația corespunzătoare este:

$$m = 1 - 0,524 \left(\frac{D}{D + a} \right)^3 \quad (73)$$

în care:

- D — este diametrul elementului rocii fictive;
- a — distanța periferică dintre două elemente vecine (nulă în cazul cînd elementele se găsesc în contact).

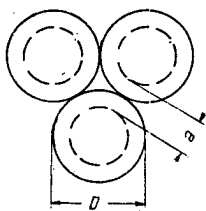


Fig. 54. Schema modificării prin dizolvare a unei roci fictive cu așezare romboedrică.

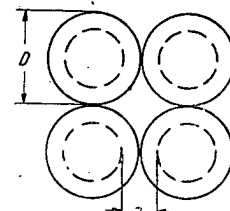


Fig. 55. Schema modificării prin dizolvare a unei roci fictive prin așezare cubică.

Chiar în cazul rocilor fictive, valabilitatea acestor relații este limitată la valori mici ale lui a față de D , deoarece este greu de admis că roca ar rămîne un agregat stabil dacă s-ar produce o îndepărtare între toți grăunții.

În tabela 16 sînt date variațiile volumului de pori din cauza creșterii distanței dintre grăunți, considerați cu diametru constant. Această situație, asemănătoare celeia prezentate la rocele reale din cauza operațiilor de acidizare, corespunde, în realitate, unei creșteri a distanței a pe seama unei scăderi a diametrului D , ceea ce provoacă sporuri efective de porozitate și de permeabilitate și mai mari; dat fiind caracterul aproximativ al relațiilor (72) și (73), s-a neglijat variația lui D .

Valorile de orientare din această tabelă trebuie considerate ca valori minime pentru rocile reale, concluzie la care se ajunge și prin

Tabela 16. Variația volumului de pori, Δm , în procente din valoarea inițială, din cauza operației de acidizare uniformă a unei roci fictive, astfel încât grosimea stratului dizolvat reprezintă $\frac{1}{3}a$ din diametrul grăunțului roci fictive

Așezare romboedrică			Așezare cubică	
$a, \%$	$m, \%$	$\Delta m, \%$	$m, \%$	$\Delta m, \%$
1	28,18	8,4	49,1	3,15
2	30,3	16,6	50,6	6,30
3	32,4	24,6	52,1	9,45
4	34,5	32,7	53,5	12,40
5	36,1	38,9	54,8	15,10

compararea rocii fictive cu rețea cubică cu roca fictivă cu rețea romboedrică, mai apropiată de rocile reale. În orice caz, trebuie evitat să se introducă în relațiile (72) și (73) pentru D valoarea diametrului maxim, cum s-a încercat uneori. Se recomandă folosirea pentru D a valorii medii ponderate cu fracțiunea ponderală granulometrică, a diametrelor diferitelor fracțiuni granulometrice componente.

În cazul variației în sens invers a distanței a , întâlnită uneori în cazul cimentării suplimentare a grăunților prin procese de precipitare chimică, relațiile (72), respectiv (73) pot fi aplicate, însă ținând seama de valoarea algebrică a lui a și numai într-o scară restrinsă. Chiar în acest caz trebuie să se ia în considerare că variația efectivă a porozității este mai mare decât cea indicată de relațiile (72) și (73), care rămâne o valoare exclusiv de orientare.

Este de observat că variații sensibile de porozitate pot fi cauzate pe aceiași cale (și suficient de exact evaluate în cazul rocilor fictive) prin exercitarea unei presiuni exterioare asupra rocii colectoare, care provoacă o deformare a grăunților la punctele de contact și, deci, o apropiere a grăunților și o scădere a volumului dintre ei, fără a produce o scădere sensibilă a volumului acestora (variația efectivă a volumului grăunților este de un ordin de mărime inferior variației volumului porilor). În practică, se preferă determinarea experimentală a variației porozității în funcție de presiune (vezi cap. IV B.b.8).

β) Pe măsură ce crește coeficientul de neuniformitate granulometrică al rocii, elementele mai fine tind să umple spațiile lăsate de elementele mai mari, iar porozitatea se reduce.

Teoretic, prin creșterea suficientă a coeficientului de neuniformitate, porozitatea tinde către zero. Rocile reale constituie cazuri intermediare, și, pentru exemplificare, dacă se pornește de la rețeaua cubică și, în centrul unui element al rețelei, un cub cu colțurile ocupate de opt optimi de element sferic cu diametrul d se interpune un element sferic cu diametrul δ , astfel ales, încât să fie tangent la cele opt optimi de sfere mari, se obține o nouă rețea, rețeaua cubică centrală, cu densitate sporită, având caracteristicile: $\delta = 0,7321$

d și $m = 0,2709$; sporul de porozitate obținut este de $-43,1\%$ din valoarea inițială a porozității, respectiv $-75,9\%$ din valoarea finală a porozității.

În cazul centrării unei rețele romboedrice prin interpunerea în centrul fiecărui tetraedru elementar a unei sfere cu diametrul δ , tangentă la cele patru sferturi de sferă cu diametrul d , din vîrfurile tetraedrului, se obține o rețea nouă, rețeaua romboedrică centrată, cu densitate sporită, având caracteristicile: $\delta = 0,22474 d$ și $m = 0,2509$; sporul de porozitate obținut este de $-3,35\%$ din porozitatea inițială, respectiv $-3,5\%$ din cea finală.

În natură, procesul de umplere a golurilor este continuat, astfel încît porozitatea rocilor reale este, în general, cuprinsă între valoarea maximă dată de roca fictivă corespunzătoare și valoarea zero, urmînd a fi determinată experimental.

2. Influența compoziției granulometrice asupra porozității poate fi dedusă din cele expuse la par. B.c. 1, porozitatea scăzînd cu creșterea coeficientului de neuniformitate granulometrică.

3. Influența porozității asupra permeabilității, foarte controversată, nu poate fi stabilită cantitativ, din cauza imposibilității de a provoca variația numai a porozității, păstrînd constante toate celelalte caracteristici ale rocii colectoare, în special, structura. Din cauza nerespectării acestei condiții, se citează ca exemplu al independenței permeabilității de porozitate, cazuri de roci cu porozitate destul de mare $10-15\%$ (argile-marne), dar cu permeabilitate nulă, sau de roci cu porozitate foarte redusă, citeva procente (calcare, dolomite, breccii), dar cu permeabilitate mare (cîteva darcy).

Din cercetarea generală a permeabilității, în funcție de porozitate, rezultă (vezi fig. 56) că nerespectarea condiției menționate determină o împrăștiere considerabilă a punctelor reprezentative, dar că se poate stabili o lege de variație calitativă și chiar semicantitativă: a) în limitele de variație a porozității rocilor colectoare ($4\% - 48\%$), permeabilitatea crește din cauza porozității și odată cu aceasta; b) această creștere nu este liniară, ci aproximativ logaritmică.

Dacă se încearcă să se încadreze repartitia statistică a cazurilor reale, se obține aproximativ:

$$k_{\max} \approx 22 \cdot 8 \cdot 10^{-6} m^{6,64} \quad (74)$$

$$k_{\min} \approx (m/20)^{19,49} \quad (75)$$

unde:

m este porozitatea rocii colectoare, în %;

k — permeabilitatea rocii colectoare, în md;

În domeniul porozităților uzuale, utilitatea practică a acestor curbe-limită de repartitie statistică este redusă, deoarece, în special la porozitățile reduse, se obțin valori de încă-

drare foarte depărtate una de alta. Pentru comparație, în tabela 17 sînt date valorile aproximative, calculate cu relațiile (74) și (75).

Valori suficient de exacte se pot determina numai în cazul porozităților de peste 35%; în aceste cazuri utilitatea lor este redusă de împrejurarea că permeabilitățile corespunzătoare sînt foarte mari, astfel încît condițiile de exploatare a zăcămintului sînt ușurate.

Tabela 17. Valorile maxime și minime probabile ale permeabilității unei roci colectoare cu porozitate dată

m %	k_{maxim} mD	k_{minim} mD	m %	k_{maxim} mD	k_{minim} mD
5	0,1	—	25	4400,0	40,7
10	10,0	—	30	14800,0	835,0
15	148,0	0,0003	35	40,750,0	10800,0
20	1000,0	0,1	40	100000,0	100000,0

Relațiile (74) și (75) și fig. 56 se referă la date culese asupra a peste 2 000 probe de roci sedimentare clastice. Pentru rocile sedimentare de precipitație organică, calcare dolomite, fig. 57 arată o distribuție analogă și o împrăștiere încă mai mare. Caracteristice acestor roci sînt punctele reprezentative corespunzătoare unor permeabilități foarte mari, pentru porozități foarte mici. Această proprietate este caracteristică rocilor ale căror canale de scurgere au una dintre dimensiuni mică față de celelalte două (fisuri).

Singura concluzie practică ce se poate trage din studiul influenței porozității asupra permeabilității este aceea că, dacă porozitatea crește peste 30–35%, permeabilitatea rocilor colectoare sedimentare clastice crește foarte mult, din cauza schimbării structurii spațiului de pori. De exemplu, dacă prin operații de acidizare, proiectate în mod adecvat, se poate spori porozitatea unei roci colectoare, foarte puțin permeabilă, de la 20–25% la 30–35%, permeabilitatea ei finală va fi în mod cert sporită considerabil (v. și « Intensificarea aflului sondelor ». Cap. XV).

Referitor la influența cantitativă a porozității asupra permeabilității, a se vedea și Cap. B.c.4. (influența compoziției granulometrice asupra permeabilității).

4. Influența compoziției granulometrice asupra permeabilității absolute. Compoziția granulometrică a rocii colectoare influențează în mod hotărîtor permeabilitatea absolută a acesteia prin a) neuniformitatea granulometrică și prin b) dimensiunea grăuntelui mediu.

Pentru rocile cu elemente cu cele trei dimensiuni sensibil apropiate, aceste influențe pot fi apreciate cantitativ, astfel: a) cu cît gradul de neuniformitate granulometrică al rocii este mai mare, cu atît porozitatea ei este mai mică și, prin influența corespunzătoare a termenilor care conțin pe m , din relațiile (76), (77), (78), (79), (80) și (81), permeabilitatea k este redusă;

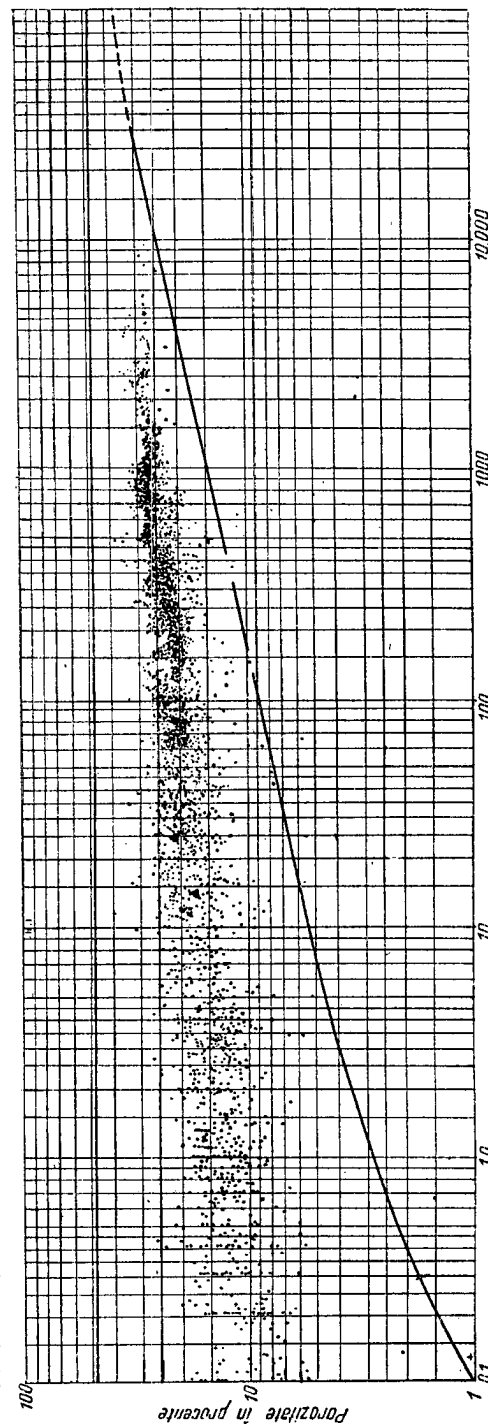


Fig. 56. Variația permeabilității în funcție de porozitate, după date statistice, pentru gresii-nisipuri.

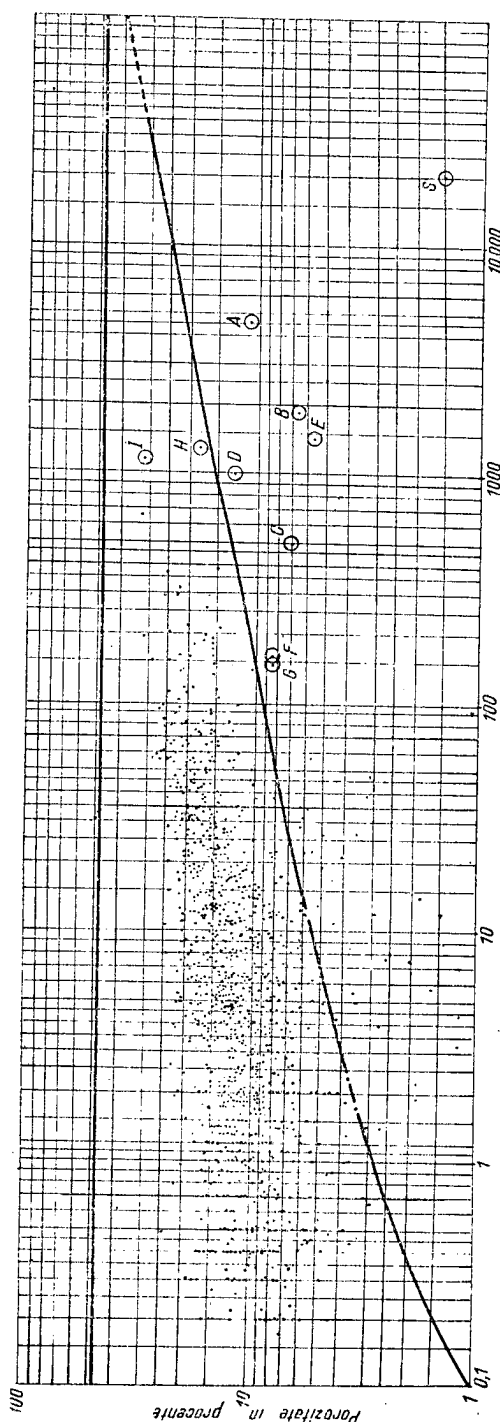


Fig. 57. Variația permeabilității în funcție de porozitate, după date statistice, pentru calcaro-dolomite.

b) cu cât dimensiunea grăunțului mediu, exprimată prin d_e , diametrul echivalent al elementului de rocă fictivă corespunzătoare (B.b.2.b) 1), este mai mică, cu atât permeabilitatea rocii este mai redusă. Pentru aprecierea cantitativă a ambelor influențe, s-au propus numeroase relații aproximative:

După Kozeny-Leibenzon:

$$k = \frac{m^3 d_e^3 (1 - n)}{54 \beta^2 (1 - m)^3} \quad (76)$$

unde:

- k este permeabilitatea absolută, în cm^2 ($1 \text{ cm}^2 = 10^8 \text{ Darcy}$);
- m — porozitatea efectivă, fracțiune subunitară;
- d_e — diametrul echivalent, în cm;
- n — coeficientul de secțiune liberă minimă, fracțiune subunitară;
- β — un coeficient numeric, egal cu $\frac{5}{3}$, în cazul unei roci fictive cu elementele dispuse astfel, încât lasă între ele canale cu secțiunea în formă de triunghi curbiliniu echilateral, respectiv cu $\frac{4}{3}$, în cazul când secțiunea are forma unui patrulater.

După Terzaghy (I):

$$k = \varepsilon \frac{m^2 d_e^2}{V(1 - m)^3} \quad (77)$$

unde:

- ε este 10,5 la nisipurile cu grăunțe rotunjite și 6,0 la nisipurile cu grăunțe colțuroase;
- sau (II):

$$k = \varepsilon \frac{(m - m_0)^2}{V(1 - m)^3} \quad (78)$$

unde $m_0 = 0,13$.

După Leibenzon:

$$k = \frac{n^2 \cdot d_e^2}{48 (1 - m)} \quad (79)$$

unde n este coeficientul de secțiune liberă minimă, fracțiune subunitară.

După Avdusin și Tvetkova:

(I) pentru rocile cu porozitate peste 0,13,

$$k = 4,94 m^2 - 763 \quad (80)$$

unde: k este permeabilitatea, în mildarcy;

m — porozitatea, în %.

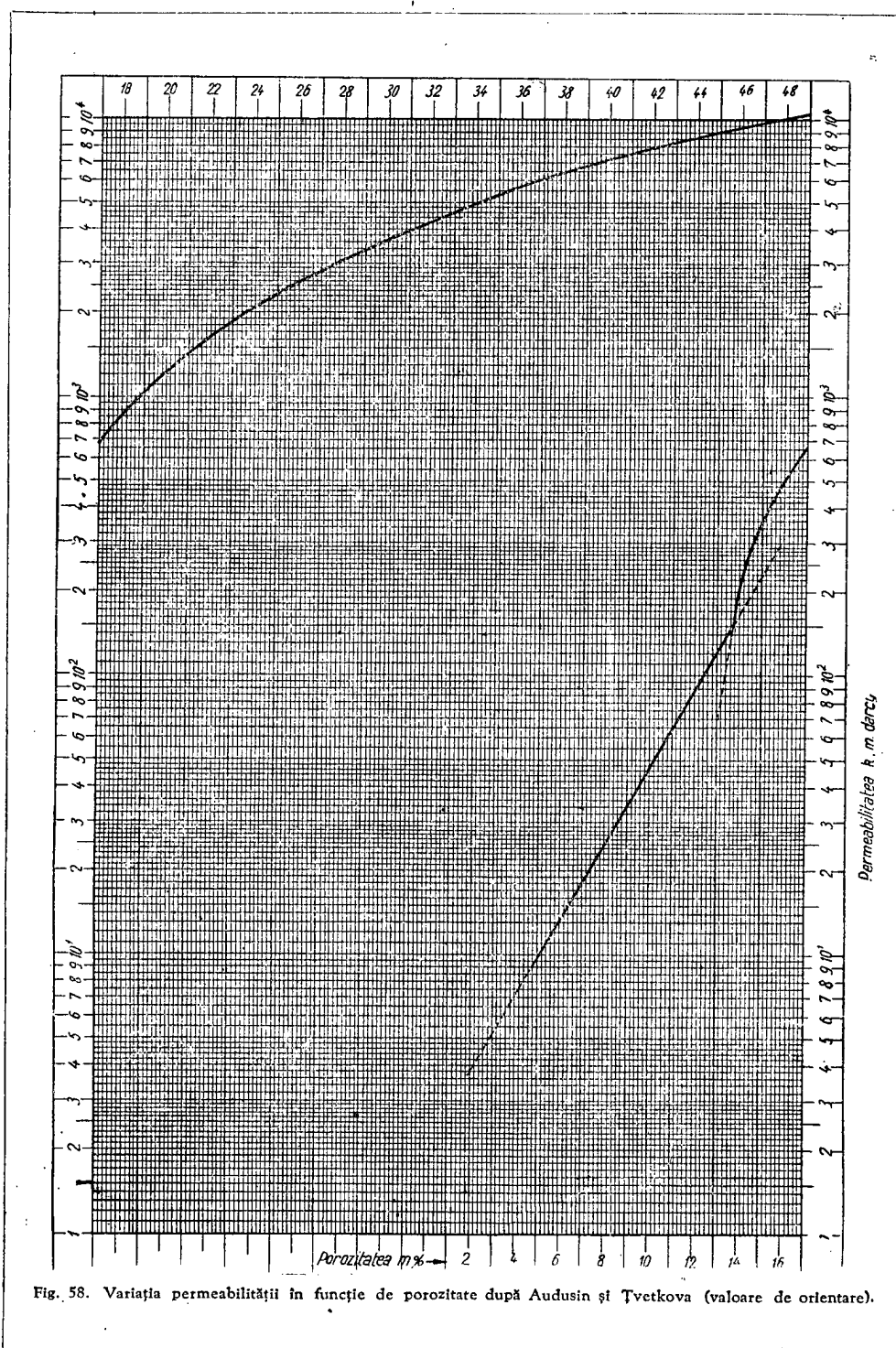
(II) pentru rocile cu porozitate sub 0,13,

$$k = 2 \cdot e^{0,316 m} \quad (81)$$

cu aceleași notații ca la (I) și $e = 2,7183$.

După F. A. Trebin:

$$k = 372 e^{-0,064 (a+b)} \quad (82)$$



unde:

- k este permeabilitatea, în mD;
- e — baza logaritmilor naturali;
- a — procentul de material nesedimentabil (considerat la liant);
- b — procentul de material pelitic, sedimentabil ($d < 0,01$ mm).

După unii autori, limita de aplicabilitate, cu o eroare relativă de $\pm 10\%$ asupra lui k , este de condiția $a + b \leq 5\%$.

Dintre aceste relații, aceea a lui Terzaghy (II), folosită mai mult la soluri, are o valoare practică redusă (nu ține seama sub nici o formă de diametrul echivalent, ci consideră permeabilitatea exclusiv ca funcție de porozitate). Relația Terzaghy (I) și aceea a lui Kozeny-Leibenzon, întrucâtva mai apropiate, sînt totuși mai puțin recomandate decît aceea a lui Leibenzon (79), a cărei corespondență cu realitatea este remarcabilă [v. tabela 18, calculată pentru o rocă fictivă cu rețea romboedrică ($n = 0,0931$)].

Valorile date de formulele Avdusin și Teverkova, neținînd seama de diametrul efectiv al bobului, dau numai o valoare de orientare (vezi fig. 58). Pentru orientare și pentru determinare rapidă este recomandată relația lui Trebin, care cere numai o determinare unică pe cale sedimentometrică a valorii ($a + b$), prin diferență.

În comparație cu rocile reale cu diametru echivalent egal, asemănătoare structural cu roca fictivă, permeabilitățile date de tabela 18 prezintă o valoare acceptabilă, cu condiția determinării cu destulă exactitate a diametrului echivalent, ceea ce practic este destul de greu, din cauza necesității de a se recurge la analize sedimentometrice în scara fracțiunilor foarte fine. Tabela 18, dă valori acceptabile pentru nisipurile folosite la fisurarea hidrolică, la filtrele cu «pietris» foarte fine și la operațiile complexe de tratare a sondei prin injectare

Tabela 18. Permeabilitatea unei roci fictive cu structură romboedrică, în funcție de diametrul

a		b	
$\frac{d}{\mu}$	k	$\frac{d}{\mu}$	k
în μ	în md	în cm	în d
* (în mm)	(în 10^3 darcy)	(în dm)	(în 10^3 darcy)
10	24,9	0,01	2,49
20	99,8	0,02	9,98
30	223,9	0,03	22,39
40	398,0	0,04	39,8
50	597,0	0,05	59,7
60	895,0	0,06	89,5
70	1219,0	0,07	121,9
80	1583,0	0,08	158,3
90	2015,0	0,09	201,5
100	2490,0	0,10	249,0

* Obs. Prelungirea tabelii 18 b, în gama diametrelor mari, pentru calculul filtrelor de pietris poate fi făcută luînd pentru k cifrele din tabela 18-a cu unitățile indicate în rîndul al doilea.

de nisip și de rășini termoplastice combinate cu fisurarea hidrolică pentru stăvilirea viiturilor de nisip foarte fin și curgător.

Pentru rocile reale, cu grăunți care se desebesc între ei și ca formă, permeabilitatea absolută este influențată nu numai de granulometrie, ci și de structura spațiului de pori. Pe cînd roca fictivă prezintă canale de pori cu secțiune poligonală-curbilinie, rocile reale prezintă canale cu secțiuni variate de la secțiunea

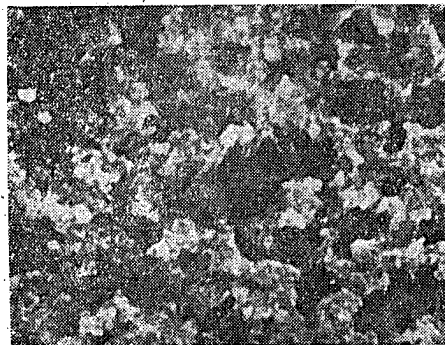


Fig. 59. Rocă cu canale capilare cu secțiunea aproximativ echidimensională (textură granulară).

apropiată de cea circulară (roci cu elemente aproximativ sferice, eterodimensionale, parțial cimentate, fig. 59), pînă la secțiunea care are o dimensiune mult mai mare decît cealaltă, comparabilă cu fisurile din calcare-dolomite (fig. 60).

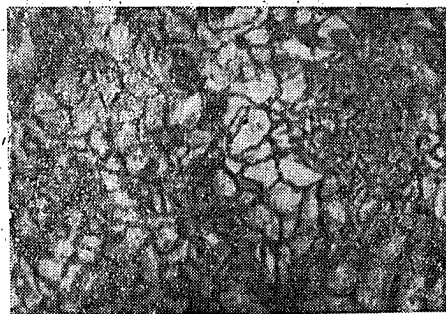


Fig. 60. Rocă cu canale capilare cu secțiunea aproximativ unidimensională.

Pentru canale circulare, după Poiseuilles (cap. I B. a. și E. a.) permeabilitatea echivalentă a canalelor capilare cilindrice crește cu puterea a doua a diametrului acestora, iar aceea a rocilor (fictive sau reale cu secțiuni de canal echidimensionale) care le conțin, la număr egal de canale, cu puterea a patra a diametrului acestora. Din determinările experimentale asu

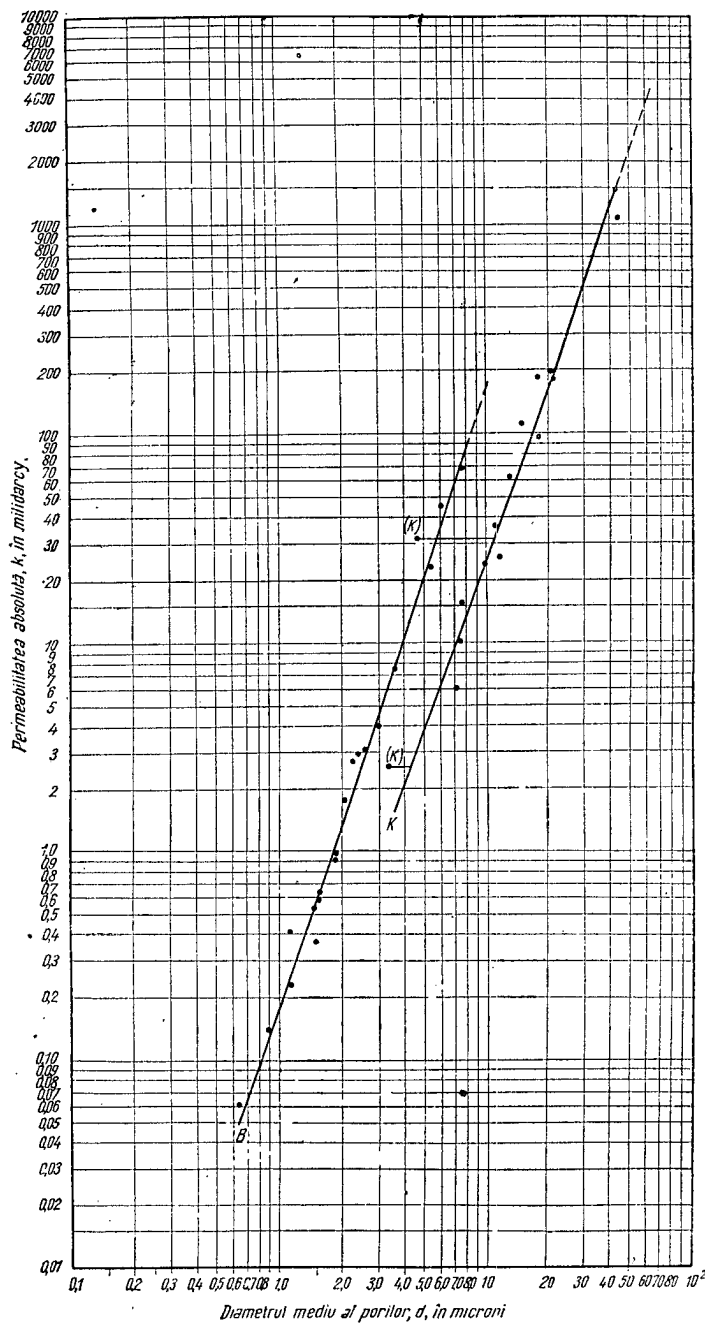


Fig. 61. Variația permeabilității în funcție de dimensiunea medie a canalului de pori:
 B — pentru nisipurile colectoare de vîrstă devoniană; K — pentru carote sintetice
 (produce ceramice).

pra unor canale cu secțiuni dreptunghiulare foarte alungite (fisuri), s-a constatat că permeabilitatea echivalentă a mediului care le conține variază cu puterea a doua a deschiderii canalului, iar aceea a rocii care le conține, la număr legal de canale, cu puterea a treia a deschiderii canalului.

Rocile reale, situându-se între aceste cazuri limită, prezintă o permeabilitate care crește cu o putere cuprinsă între puterea a doua și puterea a treia a dimensiunii medii a canalelor de pori.

Fig. 61 prezintă variația permeabilității în funcție de dimensiunea medie a canalelor de pori: pentru nisipurile silicioase ale unui zăcămint devonian, curba B și pentru carote sintetice de corindon aglomerat prin metode ceramice curba K. Exponentul care exprimă puterea deschiderii canalului mediu cu care variază permeabilitatea mediului respectiv (pentru curba în coordonate logaritmice) este 2,91 respectiv 2,75.

Relația dintre deschiderea medie a canalului de pori și permeabilitatea rocii depinde în oarecare măsură și de structura rocii. Dacă în cadrul aceleiași formații geologice relația variază puțin, ea variază sensibil de la o formație la alta; pentru a o preciza este necesar să se studieze structura formației geologice.

Acest studiu poate fi făcut: 1) fie prin impregnarea probei cu parafină topită, prin răcire, prin dizolvarea elementelor minerale cu acid fluorhidric și prin examinarea mularului de parafină, în secțiuni succesive, cu ajutorul microtomului și al microscopului; 2) fie prin tehnica preconizată de Avdusin și Țvetkova, care constă în impregnarea probei cu o rășină sintetică în stare lichidă, intens colorată în polimerizarea și în solidificarea rășinii și în examenul micrografic în secțiuni lustruite succesiv (abraziune).

5. Influența saturației asupra permeabilității. (a se vedea cap. V).

C. RECOLTAREA, TRANSPORTUL ȘI CONSERVAREA PROBELOR DE ROCĂ ȘI ORGANIZAREA ACESTOR OPERAȚII

a. Locul și frecvența extragerii probelor

Locul și frecvența extragerii probelor constituie o problemă spinoasă și mult dezbătută. Din cauza costului ridicat al operațiilor (încetinirea avansării forajului) și a riscurilor tehnice mari (pierderea găurii de sondă, în roci în care o încetinire sau o suspendare a circulației cu noroi creează riscuri de dărîmări, de prinderi de garnitură sau de erupție necontrolată). Aceste operații trebuie restrînse la strictul indispensabil.

Pentru a obține o determinare reprezentativă a valorii medii a parametrilor stratului pe baza cărora să se poată întocmi planificarea complexă a tratării zăcămintului atât în peri-

oada de deschidere prin sonde, cât și în perioada de exploatare, este necesar un număr suficient de probe pentru determinarea parametrilor calitativi ai fiecărui substrat, în interiorul căruia acești parametri nu prezintă variații relative importante, cum și pentru determinarea domeniului în care acești parametri pot fi aplicați, respectiv grosimea substratului. În roci cu mare variabilitate pe verticală a faciesului, este necesară extragerea continuă de probe din toată formația productivă, ceea ce nu se poate realiza decât rareori.

Printr-o utilizare judicioasă a probelor late-rale și a studiului proprietăților electro-chimice și electrice ale rocii, se poate reduce în mare măsură numărul de probe extrase prin carotaj mecanic pe talpă. Stabilirea programului optim de extragere de probe impune o strînsă colaborare între organele cu responsabilitate geologică, de săpare a sondelor și de fizică și de proiectarea exploatării zăcămintului.

Cu titlu de strictă orientare se recomandă (Remnev și Kotiahov), în strate relativ subțiri, scoaterea de probe din 0,30 m în 0,30 m și în strate mari, groase, din 1,00 m în 1,00 m. Dimensiunile necesare determinării complete a parametrilor rocii după tehnica respectivă fiind: diametrul de 60 mm și lungimea de 110—120 mm, procentul de carotare este de 35 %, respectiv 12 %. La stabilirea programului, trebuie avută în vedere și pierderea de carote, a cărei valoare relativă este în funcție de gradul de calificare profesională a personalului tehnic de săpare, de aparatura folosită și de natura rocii.

b. Recoltarea

Separarea mecanică a probelor de rocă din care fac parte se poate realiza:

1. Prin procesul normal de săpare care procură numai informații de orientare, deoarece fragmentele de detritus, au, în general, dimensiuni prea mici pentru a se putea face determinări de porozitate relativ exacte sau determinări de permeabilitate chiar aproximative și sînt, în general (cu excepția rocilor exclusiv silicioase sau calcaroase) alterate de contactul cu noroiul.

Informațiile obținute pierd de asemenea din valoare și din cauza impreciziei adîncimii de proveniență. Limitele posibile ale intervalului de proveniență sînt respectiv: în jos — talpa sondei, în momentul care precedă recoltarea, cu un timp egal cu durată de ascensiune a particulei recoltate, și — în sus — adîncimea sabotului ultimei coloane tubate. Împrejurarea că pereții netubați ai găurii sînt acoperiți de turta rezultată din infiltrarea noroiului constituie numai o prezumție, nu o certitudine că fragmentul recoltat provine din talpă. Probabilitatea acestei prezumții trebuie examinată de la caz la caz, în funcție de stabilitatea, constatată experimental, a pereților găurii.

2. Prin procesul de carotaj rotativ, care se poate efectua în talpa găurii și în pereții găurii de sondă. Ultimul procedeu, în stadiu de experimentare, este destinat să procure informații într-o gaură de sondă care nu a fost carotată mecanic în momentul străpunerii ei, dar care, cum s-a dovedit ulterior, este necesar să fie cercetată. Carotajul mecanic rotativ, efectuat pe talpă, constituie mijlocul cel mai indicat pentru recoltarea probelor care trebuie studiate din punct de vedere complex. (v. vol. I. Carotajul mecanic). În legătură cu acțiunea de modificare a proprietăților rocii prin infiltrația fazei continue din noroi, se menționează că această acțiune, este, în general, mai intensă la procedeele de foraj hidraulic decât la cele de foraj uscat, deoarece la forajul hidraulic, presiunea cu care noroiul tinde să se infiltreze în strat este egală cu greutatea coloanei de noroi de la talpă până la gura sondei, plus pierderea de presiune prin frecări hidraulice în spațiul inelar, plus eventual contrapresiunea cu care noroiul este evacuat la zi în cazul forajului sub presiune (v. vol. I).

Pierderile hidraulice în spațiul inelar fiind în general mai mari la forajul normal decât la carotaj, efectul de contaminare a stratului în jos, înaintea sapei, este mai accentuat la forajul normal. Pentru aceasta, porțiunea superioară a carotei, contaminată încă din timpul forajului normal cum și în timpul de inactivitate a sapei în fund, din cauza înlocuirii sapei cu carotiera, este mai alterată în general, decât restul carotei și se recomandă, pe cât posibil, să fie înlăturată de la cercetarea saturației.

Se admite totuși, mai ales la carotajul în strate puțin înclinate, că efectul de contaminare se produce radial către exterior, pe distanțe mai mari decât în jos sau radial către centrul carotei, atât din cauza anizotropiei rocii din punctul de vedere al permeabilității, cât și din cauza diferenței de presiune, care provoacă o infiltrație diferită.

3. Prin procesul de carotaj percutant, care se poate efectua fie prin operații propriu-zise de carotaj percutant în talpă, practic numai în roci dure (mai puțin răspândit astăzi chiar decât forajul percutant), fie prin luarea de probe printr-o singură percusiune, cu ciupitorul de fund sau de peretă sau cu ciupitorul balistic. Ultimul, din ce în ce mai răspândit, prezintă avantajul de a altera mecanic roca, mai puțin decât celelalte. În concepția actuală, el este un mijloc foarte prețios pentru completarea recoltării probelor de la adâncimea dorită, în urma indicațiilor date de carotajul electric, recoltarea putându-se face foarte rapid și imediat după acesta. Marele număr de probe care pot fi scoase la un singur marș constituie un avantaj important al acestei metode, permițând să se obțină valori medii mult mai reprezentative ale proprietăților rocii cercetate și compensând prin aceasta neajunsul carotajului rotativ în talpă, care poate da probe mai puțin

alterate mecanic, dar mult mai puține și mai scumpe. Utilizarea combinată a ambelor metode este recomandată, în special, în cazul rocilor cu mare variabilitate de facies pe verticală. Procedul balistic a mai arătat o particularitate interesantă și anume aceea că distanța pe care efectul de contaminare se produce radial către exteriorul găurii de sondă variază și cu saturația rocii în țitei (vezi și cap. Relații dintre permeabilitate și saturație), fiind mult mai redusă în nisipurile cu saturație mare în țitei decât în cele saturate sensibil și cu apă. Se recomandă folosirea acestei metode pentru elucidarea dubiului asupra saturației în țitei, rezultat din interpretarea diagramelor de rezistivitate electrică a rocii, în cazurile când un nisip probabil petrolifer indică totuși pe diagramă o rezistivitate relativ mică, datorită unui conținut ridicat de materii coloidale sau unei salinități mari a apei interstițiale.

Trebuie totuși să se facă rezerve în ce privește interpretarea și aplicarea datelor de porozitate și de permeabilitate obținute asupra probelor recoltate prin această metodă, din cauza probabilității de a se fi exercitat o alterare mecanică a probei în momentul separării ei din rocă.

c. Operații preliminare

Extragerea din carotieră, observarea preliminară, ambalarea și expedierea la laborator sînt operații care se efectuează la sondă cu maximum de viteză. Deși proba este alterată din cauzele expuse în cap. IV B.b.4, ea este încă susceptibilă în această fază să mai piardă din conținutul ei de apă, de hidrocarburi ușoare și în oarecare măsură chiar din cele grele.

Cu toate acestea, examenul preliminar la sondă rămîne indispensabil din cauza riscurilor de alterare a unora dintre caracteristici, oricînd posibilă. Carotele extrase prin procedul rotativ sînt scoase din tubul carotier, sînt examinate vizual în privința granulometriei, a compoziției mineralogice, a gradului de cimentare, a structurii și texturii, a indicilor de conținut de hidrocarburi (miros, culoare, proba de culoare cu solvent, proba de fluorescență), a stratificației, a unghiului de cădere aparent al stratului etc. avîndu-se în vedere să se folosească cît mai mult fețele libere ale carotei prin spargere și să se curețe pe suprafețe cît mai mici carota de stratul de noroi depus prin colmatare. După examinare și după formularea observațiilor, se marchează porțiunea superioară a probei și apoi proba se ambalează. Metodele de ambalare cuprind aproape totdeauna o învelire cu parafină a probei. Realizarea crustei prin turnare de parafină, cu punct de topire scăzut, direct asupra probei, deși se practică, nu este recomandabilă. Este preferabil ca proba, necurățată de crusta de colmatare, să fie învelită într-o foaie metalică

subțire (Sn, Al, sau, de preferat, Pb, sub 0,05 mm), aplicată pe probă cât mai exact, prin mulare, astfel încât să acopere sigur, prin suprapunere, toată suprafața acesteia și numai după aceasta să se realizeze parafinarea. În acest caz, aderența crustei de parafină este mai redusă și pentru rigidizarea ei se recomandă să se încorporeze în parafină 5–10% colofoniu sau rășini sintetice corespunzătoare.

Este necesar ca primul înveliș să fie cât mai subțire pentru a nu încălzi inutil proba și a provoca astfel prin degajarea hidrocarburilor ușoare atât pierderi de conținut, cât și formarea unei presiuni interioare care sparge crusta inițială. În cazul când proba are un conținut mare de hidrocarburi ușoare, parafinarea, oricât de îngrijită, provoacă pierderi sensibile; pentru evitarea acestora se recurge la păstrarea și la transportul probei în recipiente răcite artificial.

Pentru a evita umiditatea gheții și pentru a asigura o temperatură suficient de scăzută în tot timpul transportului, fără a da recipientului dimensiuni prohibitive, se recurge de obicei la răcirea cu CO₂ solid. În acest caz, recipientul trebuie construit astfel, încât gheața uscată să nu vină în contact cu proba, deoarece anhidrida carbonică gazoasă degajată prezintă o mare solubilitate în hidrocarburi, putând altera proba, cum și pentru că o răcire prea intensă a probei este inutilă și chiar dăunătoare. Răcirea cu CO₂ solid permite, teoretic, o răcire până la circa – 70°C. O răcire chiar numai între – 20° și – 30° este inutilă, deoarece proba în momentul extragerii din carotier începe să intre în echilibru cu atmosfera, la temperatura cu care iese din sondă (de ordinul + 10°... + 35°), astfel încât o răcire la circa 0°C este suficientă pentru a împiedica orice pierdere ulterioară. Afară de aceasta, o răcire pronunțată sub 0°C prezintă riscul congelării apei din probă și, deci, riscul dezagregării mecanice a probei.

Temperatura optimă de conservare este de 0°C... + 5°C, la care nu există nici riscul congelării eventualei ape dulci din probă și la care pierderea de hidrocarburi volatile este, practic, împiedicată.

Încorporarea probei într-un tub de rășini plastice prin mulare sau prin introducerea, urmată de lipirea etanșă a capacelor, nu este decât o metodă de conservare aproximativă, pe termen lung.

Dintre materialele folosite, bachelita și derivatele ei trebuie înlăturate din cauza opacității lor. Rășinile vinilice transparente și, în special metacrilatul de metil sînt de preferat, pentru transparența și pentru ușurința lor de închidere (solubilitate în solvenții uzuali).

Indiferent de metoda de ambalare aleasă, fiecare bucată de probă trebuie ambalată separat, purtînd o etichetă cu indicația adîncimii de proveniență, a capătului superior al probei

și a sondei de proveniență. În cazul parafinării, ele vor fi așezate într-o ladă de lemn — de obicei cu fundul în V, pentru a asigura stabilitatea în timpul transportului — pe un material de amortizare (carton ondulat, hîrtie sau talaș special de ambalaj).

În timpul transportului, proba trebuie ferită de zguduirii, și de staționări la soare sau în locuri cu temperaturi mari. În vederea unei ulterioare determinări a orientării probei pe cale polaro-magnetică, în timpul transportului sau al depozitării, proba nu trebuie așezată aproape de piese sau de aparate generatoare de cîmp magnetic. Din acest punct de vedere, trebuie să se ia măsuri pentru a preveni influența dăunătoare a sabelor încărcate cu material dur cu bază de carburi de tungsten, care au lucrat la sondă.

Proba expedită trebuie însoțită neapărat de piesele ei de identitate și de examen preliminar, de procesul verbal de extragere și de examinare, în care trebuie să se menționeze:

1. **Elementele de identitate.** Numărul sondei, regiunea, localitatea, data și numele examinătorilor, adîncimea, forma și procentul de extracție de carotă, cu mențiunea eventuală a adîncimii probabile a părților pierdute.

2. **Elementele tehnice de recoltare.** Caracteristicile noroiului: greutatea specifică, vîscozitate, filtrație, stabilitate, turtă, alcalinitate, salinitate etc. Regimul tehnologic de spălare: dimensiunile, forma și construcția carotierei, apăsarea pe talpă, numărul de rotații, presiunea la pompă, debitul de circulație, durata carotării propriu-zise cu carotiera în teren și durata întregii operații, de la extragerea din talpă a sapei anterioare carotării până la ajungerea, carotei la zi și scoaterea ei din tubul carotier presiunea probabilă a stratului evaluat în cursul forajului anterior, pe baza densității noroiului în momentele de manifestare, temperatura probabilă de echilibru a stratului (dacă există indicații de anomalii). Observații speciale asupra regimului efectiv de foraj.

3. **Elemente de examinare** litologice, stratigrafice, paleontologice, granulometrice, structură, textură, grad de cimentare, compoziție mineralogică, reacții de culoare, de fluorescență, miros etc.

d. Operații de cercetare practicate asupra probei

La primirea probei în laborator, este necesar un control imediat al stării ambalajului. Dacă acesta este găsit intact și satisfăcător, analizarea probei poate fi aminată *) până la timpul planificat pentru ea în programul laboratorului, cu condiția ca proba să fie conservată într-un frigider, de preferință umed, la temperatura de + 1°... + 2°. Dacă starea de

*) În principiu o asemenea aminare nu este de dorit, singura ei justificare fiind lipsa de posibilități imediate de analiză.

ambalare a probei este găsită defectuoasă, trebuie să se procedeze imediat la analiza ei, deoarece o refacere a ambalajului ar implica noi pierderi probabile de fluide din rocă.

Succesiunea operațiilor, pentru o probă cu dimensiunile: diametrul de 60 mm și lungimea de 110 mm, este în principiu următoarea: se curăță proba de crusta de noroi și se aleg porțiuni omogene de probă, căutând să se evite introducerea în cilindru cu diametrul de 110

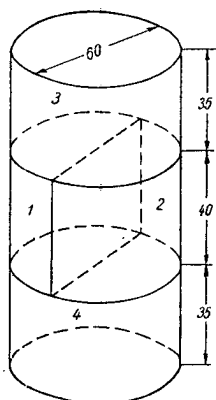


Fig. 62. Schema de divizare a unei carote pentru analiză.

Pentru înlăturarea porțiunilor alterate ale probei, se reduce diametrul probei la circa 30 mm prin metode mecanice adecvate compacității și rezistenței probei, evitându-se vitezele mari de roadere sau de tăiere care ar altera proba prin încălzire. Este de dorit ca prelucrarea să fie făcută într-o încăpere cu temperatură joasă și cu umiditate atmosferică cit mai ridicată, eventual artificial, până la circa 80–90%, deși lucrul în aceste condiții este relativ obositor și neigienic.

După reducerea diametrului, proba este secționată ca în schema din fig. 62.

Porțiunea cilindrică medie cu fragmentele 1 și 2, după toate probabilitățile cea mai puțin alterată, este rezervată determinării:

- porozității absolute;
- saturației cu apă;
- conținutului în cloruri;
- conținutului în carbonați;
- unghiurilor de contact;
- greutateții specifice a elementelor minerale.

Asupra probei 1, cu colțurile și cu muchiile rotunjite pentru a reduce pierderile mecanice în cursul cercetării, se efectuează: α_1) determinarea volumului brut V_b , prin cântărire la aer, înainte și după parafinare, apoi în apă distilată (v. Cap. III B.b.3.c.) 3), β_1) determinarea saturației cu apă, cu aparatul D.S.; γ_1) determinarea conținutului în cloruri, după sfărîmarea, spălare în rate cu apă distilată și titrare cu NO_3Ag și CrO_4K .

Asupra probei 2, cu colțurile și cu muchiile rotunjite, se efectuează: α_2) Determinarea saturației în țitei prin extracție cu solvent (v. Cap. III B.b.4.b.) 2).

Saturația în țitei a probei 1 este determinată cu relația:

$$S_f = \frac{V_f}{mV_b} \quad (83)$$

în care:

V_f este volumul țiteiului conținut de proba 1, după datele determinate asupra probei 2, în cm^3 ;

m — porozitatea absolută a probei 1.

$$V_f = \frac{1}{\gamma_f} \left(p_1 \frac{p_1}{p_2} - V_a \cdot \gamma_a \right) \quad (84)$$

unde: γ_f este greutatea specifică a țiteiului, în g/cm^3 , cunoscută prin măsurători efectuate asupra țiteiului extras din același strat prin alte sonde;

p_1 — greutatea lichidelor conținute de proba 2, $p_1 = p_2 - p'_2$, în g;

V_a — volumul apei conținute în proba 1, citit la fiola colectoare a aparatului D.S., după răcire;

γ_a — greutatea specifică a apei, la temperatura la care s-a determinat V_a , în g/cm^3 .

β_2) Determinarea porozității absolute, prin calcul, cu relația:

$$m = 1 - p'_2 \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{1}{V_b \cdot \gamma_g} - V_{\Sigma} \quad (85)$$

în care: m este porozitatea absolută;

p'_2 — greutatea probei 2, după extracție și după uscare, în g;

p_2 — greutatea probei 2, înainte de extracție și de uscare, în g;

p_1 — greutatea probei 1, înainte de uscare și de extracție, în g;

V_b — volumul brut al probei 1, în cm^3 ;

γ_g — greutatea specifică a elementelor minerale ale probei 1, (medie), în g/cm^3 ;

V_{Σ} — volumul sării conținută în proba 1, în cm^3 ,

$$V = \frac{c}{2,16} \cdot A \quad (86)$$

unde: c este concentrația în cloruri (exprimată ca NaCl) a apei de spălare a probei, obținută prin titrare, în g/cm^3 soluție;

A — volumul total de apă distilată folosit pentru antrenarea sării, în cm^3 ;

2,16 — greutatea specifică a clorurii de sodiu în stare cristalină.

γ_2) Determinarea porozității efective prin cântărirea probei extrase și uscate în aer și, după saturarea cu benzen, în benzen, cu relația

$$m_e = 1 - \frac{p'_2 - p''_2}{V_b - \gamma_B} - V_{\Sigma} \frac{p_2}{p_1} \quad (87)$$

în care m_e este porozitatea efectivă;

p'_2 — greutatea aparentă (cufundată în benzen) a probei 2, extrasă, uscată și saturată cu benzen, în g;

γ_B — greutatea specifică a benzenui, la temperatura efectivă de lucru, în g/cm³.

δ_2) Determinarea conținutului în carbonați. După determinările menționate mai înainte, se fragmentează proba 2, în două sau în trei bucăți destinate determinării conținutului în carbonați după una dintre metodele indicate (Cap. III B.b.7). Distribuția carbonaților în rocile colectoare fiind deseori neregulată, este necesar să se facă mai multe determinări pe fragmente mici. Deși media conținuturilor ar putea fi indicată de o analiză unică pe un fragment mai mare, divizarea în fragmente mici și analizarea lor separată, dau, afară de valoarea medie, limitele și frecvența variației conținutului în carbonați.

ε_2) Determinarea unghiului limită de contact (v. Cap. V F.j.).

η_2) Greutatea specifică a elementelor minerale ale probei.

Asupra probei 3 se efectuează: α_3) determinarea permeabilității efective față de gaze; β_3) determinarea coeficientului de extracție în țiței prin dezlocuire și prin spălare cu gaze; γ_3) determinarea permeabilității absolute (v. Cap. III B.b.5).

Din proba 3 se taie o epruvetă cilindrică cu diametrul și cu înălțimea de 30 mm, axul cilindrului fiind luat paralel cu planul de stratificație. Asupra acestei epruvete se efectuează determinările $\alpha_3 \dots \gamma_3$, determinarea γ_3 , fiind precedată de o extracție cu solvent în extractorul Soxhlet. După determinarea γ_3 , se taie din nou epruveta, obținându-se un cilindru înscris în cel precedent, avind însă axul perpendicular pe planul de stratificație, și se determină permeabilitatea absolută și după această direcție de curgere, cum și raportul permeabilităților absolute.

Asupra probei 4 se efectuează de obicei: α_4) determinarea permeabilității efective a rocii saturată natural cu țiței, față de apă; β_4) determinarea coeficientului de extracție în țiței, prin dezlocuire și prin spălare cu apă; γ_4) determinarea saturației minime cu apă prin metoda capilară (v. Cap. V) și, cu excludere reciprocă: δ_4) analiza granulometrică sau ε_4) determinarea sporirii permeabilității absolute prin acidizare.

Pentru accelerarea operațiilor, extracția cu solvent în aparatul Soxhlet poate fi făcută simultan pentru probele 3 și 4, dar nu se recomandă tratarea simultană, ci separată a probei 2.

Determinarea ε_4 constituie o operație care nu conservă nici caracteristicile, nici materia rocii. De aceea ea trebuie efectuată odată cu determinarea δ_4 , cu δ_2 sau cu γ_1 ori decite ori una dintre aceste determinări poate fi eventual suprimată.

Dat fiind caracterul complex al problemei, este de preferat să se sacrifice în acest scop o probă separată, din care, asupra unor epruvete multiple, să se poată trage concluzii în legătură cu efectul fiecărui reactiv (dozare, concentrație, durată, succesiune etc.).

BIBLIOGRAFIE

- AVDUSIN P. P.: Rocile sedimentare argi oase. Moscova. Editura Academiei de Științe U.R.S.S., 1953.
- BROD I. O.: Zăcămintele de țiței și gaze. Editura Tehnică de Stat, 1951.
- CRÎLOV A. P. și MURAVIEV I. M.: Exploatarea zăcămintelor de țiței. Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1949.
- CRÎLOV A. P. și a.: Bazele științifice ale exploatarei zăcămintelor de țiței. Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1948.
- DAHNOV V. A.: Prospeccțiunea electrică a zăcămintelor de țiței. Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1951.
- GAZIEV G. N. și CORHANOV I. I.: Exploatarea zăcămintelor de țiței. Bacu. Editura tehnico-științifică pentru literatura petrolului și combustibililor minerali, 1950, partea I.
- HOTIAHOV F. N., REMNEV B. F., BUTORIN. N. P.: Analiza carotelor din zăcămintele de țiței. Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1948.
- MIRCINC F. M.: Geologia industrială a petrolului. Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1946.
- MAXIMOVICI G. K.: Metodele moderne de cercetare a proprietăților straturilor petrolifere. Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1947.
- MAXIMOVICI G. K.: Proprietățile straturilor petrolifere. Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1949.
- ORKIN K. G., KUCINSKI K. P. și GLADCOV I. T.: Probleme la cursul « Exploatarea zăcămintelor de țiței ». Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1953.
- ORKIN K. G. și KUCINSKI P. K.: Lucrări de laborator la cursul « Fizica straturilor petrolifere ». Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1952.
- SCELKACEV V. N. și LAPUK B. B.: Hidraulica subterană. Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1949.
- TREBIN F. A.: Permeabilitatea față de țiței a rocilor colectoare nisipoase. Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1945.
- VASILEEV. V. G.: Îndrumătorul geologului de gaze naturale, volumul II. Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1952.

CAPITOLUL IV

**FIZICA ZĂCĂMINTELOR DE ȚITEI ȘI GAZE.
PROPRIETĂȚILE FIZICE ȘI CHIMICE ALE FLUIDELOR CARE
SATUREAZĂ ÎN MOD NATURAL SAU ARTIFICIAL ROCILE
COLECTOARE ȘI ROCILE ÎNVECINATE**

**A. COMPLEMENTE DE FIZICO-CHIMIE
ÎN LEGĂTURĂ CU CONDIȚIILE DE
PREZENTARE ȘI DE COMPORTARE
A SISTEMELOR FLUIDE DIN ZĂCĂ-
MINELE DE HIDROCARBURI**

a. Stări de agregare și schimbarea lor

Sistemul simplu sau unicomponent este sistemul material constituit dintr-o singură substanță definită, orice element al sistemului cuprinzând o singură specie de molecule. Sistemul multicomponent este sistemul material constituit din specii diferite de molecule. În cele ce urmează se vor examina numai sistemele în echilibru mecanic, termic și chimic, astfel încât, prin definiție, speciile diferite de molecule ale sistemelor multicomponente vor fi considerate că nu reacționează chimic între ele cu viteză finită.

Sistemele multicomponente pot fi: *omogene*, în cazul când orice element al sistemului cuprinde molecule din toate speciile sistemului, în aceeași proporție și în aceeași stare de agregare cu aceea a sistemului, sau *eterogene*, în cazul când anumite porțiuni ale sistemului, denumite faze, cuprind molecule din toate sau din o parte din speciile întregului sistem, în proporție sau în stare de agregare diferită de aceea a restului sistemului, însă constantă în cuprinsul unei aceleiași faze.

1. Sistemele simple pot fi eterogene numai prin transformări de stare de agregare. Fluidele din zăcămintele de petrol și de gaze satisfac, luate izolat, legile generale de comportare în stare de agregare ilustrate în fig. 1. Starea de agregare a unui sistem simplu este determinată de natura lui și de parametrii: presiune și temperatură. Influența altor factori fizici, de exemplu: cîmp luminos, cîmp electromagnetic, cîmp electrostatic etc. este, din punct de vedere practic, nulă.

La presiune constantă cu creșterea temperaturii, sau la temperatură constantă cu scăderea presiunii, sistemele simple prezintă tendința de a trece din starea de agregare solidă în cea lichidă și, apoi, din cea lichidă în cea gazoasă, trecere care corespunde, în general, unei dispersiuni moleculare și unei creșteri

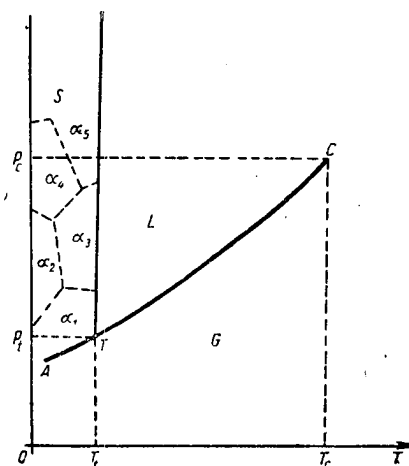


Fig. 1. Comportarea în stare de agregare a unui sistem unicomponent:

C — punctul critic; α_1 — starea alotropică I;
T — punctul triplu; α_2 — starea alotropică II;
S — domeniul stării solide; α_3 — starea alotropică III;
L — domeniul stării lichide; α_4 — starea alotropică IV;
G — domeniul stării gazoase; α_5 — starea alotropică V.

a volumului specific. Excepțiile, atât de puține, încât, în cadrul condițiilor de zăcămint, niciunul dintre fluidele respective nu le prezintă, pot fi explicate prin transformări alotropice care, în sens larg, sînt și ele schimbări de stare de agregare.

Diferența dintre starea solidă și cea fluidă (lichidă și gazoasă) constă în «indeformabi-

litatea» relativă a solidelor și este exprimată analitic prin condițiile:

$$G \neq 0 \text{ pentru solide}$$

$$G = 0 \text{ pentru fluide;}$$

unde G este modulul de elasticitate transversală, la solicitări mecanice mici și lente.

Observație. Starea cristalină sau cea amorfă, respectiv repartiția atomilor în rețea cristalină sau în rețea neregulată, nu constituie din acest punct de vedere un criteriu, deoarece caracterul de «stare lichidă» atribuit uneori solidelor în stare amorfă, deși explică uneori mult mai corect comportarea la solicitări mecanice a unor solide amorfice (sticla, smoala etc.), nu este, în general, admis și se cunosc cristale lichide (para-azo-oxi-anisolu, para-azo-oxi-anetolu, azo-oxi-fenetolu, unii oleați etc.).

Deosebirea dintre starea lichidă și cea gazoasă are un caracter mult mai puțin precis și este posibilă numai în prezența ambelor faze: faza lichidă prezintă densitate mai mare, viscozitate mai mare, indice de refracție mai mare, căldură specifică mai mare și, una dintre caracteristicile cele mai sensibile, permitivitate electrică mai mare*). Diferențele dintre proprietățile fizice respective sînt relativ mari la temperaturi și la presiuni joase și scad treptat cu creșterea temperaturii și a presiunii, pentru a se anula complet la punctul critic. La temperaturi mai înalte decît cea critică sau la presiuni mai înalte decît cea critică (dar în acest caz, numai la temperaturi mai înalte decît cele determinate de ramura de curbă TB) (fig. 1), sistemul se găsește într-o stare fluidă, calificată în mod convențional ca stare gazoasă. În domeniul S , sistemul se găsește în stare solidă, acest domeniu fiind deseori divizat în domenii de stabilitate a diferite stări alotropice. În domeniul L , sistemul se găsește în mod stabil în starea lichidă (el se poate găsi în stare lichidă instabilă, supratopire, într-o mică regiune la stînga ramurii TB , în domeniul S , sau în stare de lichid supracîlzit, la dreapta ramurii TC , în domeniul G ; impietările domeniului L asupra celorlalte două sînt relativ ușor de realizat experimental, pe cînd cele inverse sînt mult mai rare).

În domeniul G , sistemul se găsește în starea gazoasă.

La temperaturi și la presiuni joase, deosebirea între starea lichidă și cea gazoasă se face vizual, în mod intuitiv, pe baza diferenței

indicilor de refracție și de culoare. La temperaturi și la presiuni la care observația vizuală nu este posibilă, distincția poate fi făcută pe baza urmării conținutului de căldură (entalpiei). La presiunea constantă P_1 , entalpia sistemului crește cu temperatura, prezentînd discontinuități în punctele de transformare

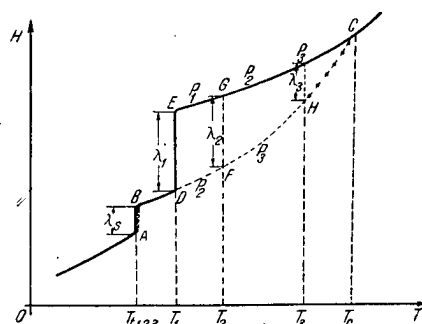


Fig. 2. Variația izobară a entalpiei unui sistem unicomponent în funcție de temperatură: A — transformare la presiunea P_1 ; B — transformare la presiunea P_2 ; C — transformare la presiunea P_2 egală cu presiunea critică.

(v. fig. 2). În starea solidă, panta curbei de la stînga punctului A reprezintă $\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p$, căldura

specifică în starea solidă; în punctul A, sistemul absoarbe treptat căldura latentă de topire λ_s , ridicîndu-și la temperatura constantă de topire T_1 , entalpia, pînă la valoarea corespunzătoare punctului B, în care topirea este terminată. Pe ramura BD, sistemul este încălzit în stare lichidă la presiunea constantă P_1 , panta curbei fiind egală cu căldura specifică la presiunea P_1 a lichidului. În punctul D, sistemul începe să treacă în starea gazoasă, își ridică la temperatura constantă T_1 entalpia, absorbînd treptat căldura latentă de fierbere λ_l , pînă la valoarea corespunzătoare punctului E, în care fierberea este terminată. Pe ramura EC, sistemul, trecut în starea gazoasă, absoarbe căldură conform unei pante a curbei $\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p$ egală cu căldura specifică în starea

gazoasă corespunzătoare. Repetînd ciclul de încălzire la o altă presiune, P_2 , se observă o variație practic neglijabilă a temperaturii de topire T_2 și a căldurii latente de topire, însă o variație sensibilă, în cazul de față ($P_2 > P_1$), o creștere sensibilă a temperaturii de fierbere de la T_1 la T_2 și o scădere sensibilă a căldurii latente de fierbere de la λ_l la λ_2 . Pentru o presiune și mai mare, P_3 , variația temperaturilor de fierbere și a căldurilor latente are loc în același sens, temperatura de fierbere crește la T_3 , iar λ scade la λ_3 . Mărinđ presiunea pînă la cea critică P_c , sistemul parcurge prin încălzire izobară curba $ABDFHC$ și din faptul că λ devine nul, se poate trage concluzia că transformarea dintr-o fază fluidă în cealaltă

*) Compresibilitatea elastică β a fluidelor (Cap III B. b. 8.), deseori citată ca criteriu de deosebire între starea lichidă și cea solidă, nu are mai multă valoare, lichidele nefiind incompresibile, ci numai mult mai puțin compresibile decît gazele, la temperaturi și la presiuni mult inferioare celor critice. La temperaturi și la presiuni înalte, deosebirea dispare. Singura valoare a criteriului constă în forma legii de variație a volumului cu presiunea, la lichide influențînd preponderent factorul e^{-aP} , iar la gaze influențînd preponderent factorul P^{-b_0} .

nu mai are loc sau, conform definiției exacte a stării critice, că faza lichidă și cea gazoasă se confundă. Experiențele dovedesc că în cazul acestor transformări, are loc nu numai o anulare a diferenței de entalpie (λ) a celor două faze, ci anulara deosebirilor dintre toate celelalte proprietăți fizice ale fazei lichide, respectiv gazoase.

Egalitatea volumelor (și greutateilor) specifice poate fi dedusă și din ecuația Clausius-Clapeyron,

$$\lambda = \frac{T}{A} (V - v) \frac{\partial P_v}{\partial T} \quad (1)$$

în care:

λ este căldura latentă de transformare (diferența de entalpie dintre faze), în kcal/kg;

V — volumul specific al fazei gazoase, în m^3/kg ;

v — volumul specific al fazei lichide, în m^3/kg ;

P_v — presiunea de vapori, în kg/m^2 ;

T — temperatura sistemului în echilibru, în $^\circ\text{K}$;

A — echivalentul mecanic al kilocaloriei, în kgm/kcal ,

dacă se ține seama că $\frac{\partial P_v}{\partial T} \neq 0 \neq T$.

Pentru utilizarea ecuației $f(T) = P_v$, (v.B.d.1.).

Caracteristică pentru apropierea proprietăților celor două faze cu apropierea de punctul

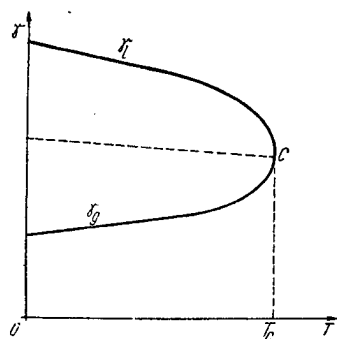


Fig. 3. Variația în echilibru, în funcție de temperatură, a greutății specifice a fazei lichide și a fazei gazoase, γ , în prezență simultană, în cazul unui sistem cu un singur component: T — temperatura; γ_g — greutatea specifică a fazei gazoase, γ_l — greutatea specifică a fazei lichide; T_c — temperatura critică.

critic, este fig. 3, care reprezintă variația greutății specifice a celor două faze în echilibru, exprimată prin legea diametrului liniar,

$$\frac{\gamma_g + \gamma_l}{2} = a + bT \quad (2)$$

unde

γ_g este greutatea specifică a fazei gazoase, în kg/m^3 ;

γ_l — greutatea specifică a fazei lichide, în kg/m^3 ;

a și b — constante caracteristice substanței;

T — temperatura absolută a sistemului, în $^\circ\text{K}$, lege empirică, care, deși remarcabil verificată în gama presiunilor și a temperaturilor medii și înalte, este nesatisfăcătoare în gama presiunilor joase *).

a) Trecerea dintr-o stare de agregare în alta a fiecărui sistem cu un singur component se face la presiune, în funcție exclusiv de temperatură, presiunea de echilibru a celor două faze, determinată de ramura de curbă respectivă (AT, BT și CT, fig. 1) (în conformitate cu legea fazelor v., VI A. b.). Practic interesează numai ramura TC. Presiunea de echilibru respectivă este numită și tensiunea de vapori, P_v . Funcția $P_v = f(T)$ există numai în domeniul de temperaturi (respectiv de presiuni) $T - C$ este caracteristică fiecărei substanțe (v. proprietățile fizice ale fiecăruia dintre fluide, IV B.a....d) și este determinată de ecuația (1), care în gama presiunilor reduse (departe de C. fig. 1) poate fi folosită practic pentru determinarea valorii P_v , pe baza cunoașterii căldurii latente de transformare, relativ puțin variabilă în acest domeniu, sau pe baza comparației cu P_v a unei alte substanțe cunoscute. În gama presiunilor (respectiv a temperaturilor) apropiate de C (fig. 1), ecuația (1) este, practic, mai degrabă utilizabilă pentru determinarea energiei de transformare λ , pe baza cunoașterii tensiunii de vapori P_v din determinări directe experimentale.

Din cauza numărului mare de hidrocarburi conținute de zăcăminte, pentru determinarea P_v a celor nestudiate experimental în gama presiunilor depărtate de cea critică, s-au propus:

1) Formule derivate din (1), în ipotezele că v este neglijabil față de V și că faza gazoasă se conformează legii gazelor perfecte ($PV = RT$),

$$\frac{dP_v}{dT} = \frac{\lambda P_v}{RT^2} \text{ sau } \log P_v = A - \frac{B}{C + t} \quad (3)$$

unde A , B și C sînt coeficienți specifici substanței respective (practic, deoarece teoretic C ar trebui să fie egal cu $273,13^\circ\text{K}$);
 t — temperatura sistemului, în $^\circ\text{C}$.

Practic, determinarea coeficienților A , B și C , în cazul unei substanțe date, pe baza cunoașterii presiunilor de vapori $P_{v.1}$, $P_{v.2}$ și $P_{v.3}$,

*) Fig. 3 este reprezentativă și pentru alte proprietăți fizice ale celor două faze, de exemplu: indice de refracție, căldură specifică etc.

corespunzătoare temperaturilor t_1 , t_2 și t_3 , se face cu relațiile:

$$A = \frac{n \log P_{v.1} - \log P_{v.2}}{n - 1}$$

$$B = \frac{(t_2 - t_1)(A - \log P_{v.1})(A - \log P_{v.2})}{\log P_{v.2} - \log P_{v.1}} \quad (4)$$

și

$$C = \frac{B}{A - \log P_1} - t_1$$

în care:

$$n = \frac{(t_2 - t_1)(\log P_{v.3} - \log P_{v.2})}{(t_3 - t_2)(\log P_{v.2} - \log P_{v.1})}$$

2) Formule de tipul Dupré-Hertz,

$$P_v = \frac{A}{T} + B \log T + C, \quad (5)$$

bazate pe o variație ipotetică liniară a căldurii latente de vaporizare, în funcție de temperatura absolută, întrucâtva mai exactă, dar de aplicație practică mai dificilă.

4) Formule de tipul Nernst,

$$\log P_v = \frac{\lambda_0}{4,575 T} + 1,75 \log T - \frac{T}{4,575} + C, \quad (7)$$

în care:

λ_0 este căldura latentă de vaporizare, în cal/g;

C — constantă specifică substanței.

5) Formule de tipul Sapiro

$$\ln \frac{P_c}{P_v} = k \frac{(1 - \tilde{T}^2)^m}{\tilde{T}^n} \quad (8)$$

în care:

P_c este presiunea critică, în kg/m²;

\tilde{T} — temperatura redusă, adimensională;

k , m și n — coeficienți constanți, specifici substanței, al cărei domeniu de aplicabilitate este mai larg decât al precedentelor, însă de aplicație destul de greoaie.

6) Metoda Kireev, care, deși bazată pe aceleași ipoteze ca (3), totuși, cu corecții, datorită căii grafice, este aplicabilă mult mai ușor și cu anumite corecții, într-un domeniu relativ larg de presiuni.

Ea constă în compararea pe cale grafică a curbei $P_v = f(t)$ a corpului de cercetat, cunoscută parțial prin unul sau prin câteva puncte, cu curba $P_v = f(t)$ complet studiată a unui alt corp cu constituție chimică pe cât posibil apropiată (condiție care nu este indispensabilă, însă este ușor de îndeplinit în cazul hidrocarburilor) și cu proprietăți fizice de stare de agregare pe cât posibil apropiate.

Ea se bazează pe faptul că faza gazoasă s-ar conforma ecuației (3), astfel încât

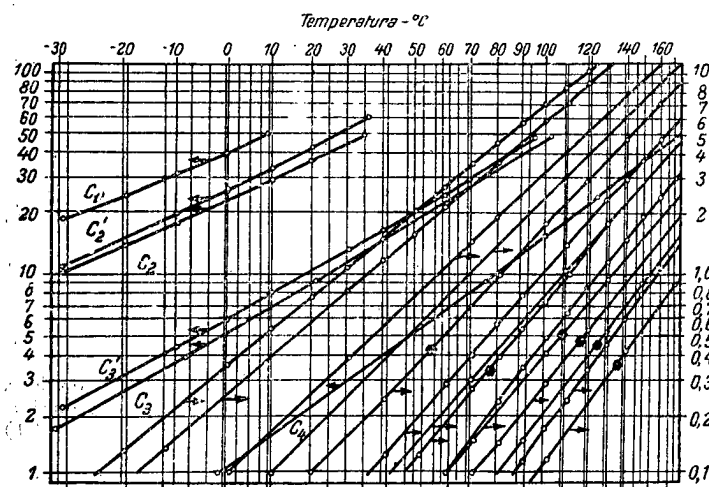


Fig. 4. Aplicarea metodei Kireev la tensiunile de vapori ale hidrocarburilor, prin comparație cu hexanul. Curbele pentru etilen, pentru acetilen, etan, propilen, propan și pentru butan se referă la scara din stînga a presiunilor, celelalte, la scara din dreapta. Curbele marcate cu \diamond reprezintă comportarea hidrocarburilor aromatice.

3) Formule de tipul

$$\ln P_v - a \frac{P_v}{T} = K - m \cdot \ln T - \frac{n}{T} \quad (6)$$

în care:

a , k , m și n , sînt constante specifice substanței, dedusă pe aceeași cale ca (3), însă în ipoteza că faza gazoasă se conformează legii aproximative a gazelor reale, Van de Waals.

$$\frac{dP_v}{P_v} \cdot \frac{1}{L} = \frac{dT}{RT^2} = \frac{dP'_v}{P'_v} \cdot \frac{1}{L'} \quad (9)$$

unde L este căldura latentă molară;

R — constanta generală a gazelor, iar indicii ($'$) se referă la substanța cunoscută, astfel încît

$$\log P_v = \frac{L}{L'} \log P'_v + C \quad (10)$$

unde C este o constantă de integrare, iar L/L' este practic constant pentru un anumit cuplu de substanțe.

Fig. 4 indică modul de utilizare a metodei, aplicat la o serie reprezentativă de hidrocarburi, cum și faptul că aplicabilitatea ei până în vecinătatea punctului critic este remarcabilă.

Se observă comportarea particulară a aromaticelor.

Cu toate acestea, utilitatea ei la această gamă restrinsă de presiuni și de temperaturi constă în determinarea lui λ , pe baza datelor experimentale de P_v .

b) *Legea de stare. Volume specifice.* Pentru orice sistem unicomponent se poate concepe și determina experimental în tot domeniul lui de stabilitate chimică, o lege de forma

$$F(P, v, T) = 0, \quad (11)$$

care permite determinarea volumului specific v , al componentului sistemului, la orice temperatură și la orice presiune în acest domeniu, pentru fiecare dintre stările de agregare stabile. Nu se cunoaște pentru nici o substanță o expresie analitică unică*) și exactă de forma (11). Reprezentarea grafică în sistemul de coordonate: presiune absolută, volum spe-

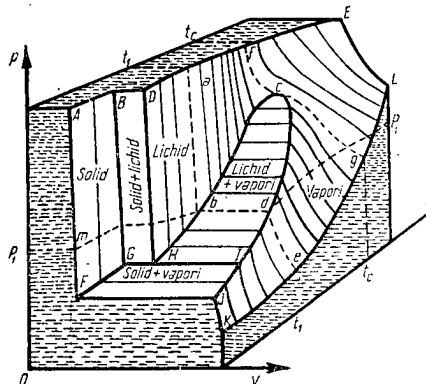


Fig. 5. Reprezentarea în coordonatele: presiune absolută, volum specific și temperatură absolută, a suprafeței corespunzătoare legii de stare a unui sistem simplu, cu o singură stare alotropică în fiecare stare de agregare: ABD af EL ge KIFA — suprafața de stare; ABFG — suprafața de stare solidă; BDHG — suprafața de topire — solidificare; DafCbHD — suprafața de stare lichidă; FGHIF — suprafața de sublimare; KJldCgek — suprafața de stare de vapori; ff...LgCf — suprafața de stare gazoasă convențională (deasupra punctului critic C); m n o b d q — curba de transformare izobară, la presiunea P_1 ; a b d e — curba de transformare izotermă, la temperatura t_1 ; fCg — curba de transformare izotermă, la temperatura critică, t_c ; C — punctul critic; H — punctul triplu.

cific, și temperatură absolută, a determinărilor experimentale este dată în fig. 5, în perspectivă. Practic, suprafața este studiată parțial fie prin metoda proiecțiilor pe planul a două variabile (de exemplu, P, T , ca în fig. 1), neglijând a treia variabilă, fie prin metoda secțiunilor,

*) În tot domeniul (P, T).

considerînd a treia variabilă ca o constantă (de exemplu curbele izoterme, mai frecvent studiate, fig. 6).

Exprimarea analitică aproximativă este posibilă empiric numai pe domenii restrinse de P, T și, în general, mai comodă prin derivatele curbelor de intersecție respective, derivate parțiale ale funcției care, local exprimă ecuația (11). De exemplu pe izoterma a, b , compresibilitatea lichidului

$$\beta = - \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \cdot \frac{1}{V} \quad (12)$$

este, în general, foarte mică și variază foarte puțin cu presiunea, astfel încît deseori, în primă aproximatie, este considerată constantă (v. Cap. IV B.a.2 și B.b.3).

De asemenea, coeficientul de dilatare termică

$$\alpha = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \cdot \frac{1}{V} \quad (13)$$

este foarte mic, cu excepția gazelor care prezintă pentru α o valoare mai mult sau mai puțin apropiată de $1/273, (^{\circ}\text{C})^{-1}$, după cum gazul se apropie mai mult sau mai puțin de un gaz perfect. Pentru lichide și pentru solide (afară de transformări alotropice), α poate fi exprimat printr-o funcție polinomială de temperatură, ai cărei termeni scad foarte repede în importanță relativă, cu puterea temperaturii (v. Cap. IV B.b.4 în particular pentru apă, B.a.1, fig. 5).

Punctele singulare (C, punctul critic, și H, punctul triplu, fig. 5) prezintă, în cazul substanțelor pure, o stabilitate care le face indicate (practic numai H, fiindcă C este greu realizabil și observabil) ca etaloane absolute, deocamdată numai pentru temperatură (acidul benzoic), deși teoretic sînt utilizabile și pentru presiune.

Exprimarea directă, mai generală, sub forma primitivă a funcțiilor (12) și (13) se face deseori numai grafic, prin diagrame de tipul celor din fig. 6, respectiv 7.

Pentru definirea relației (11) s-au propus numeroase ecuații:

$$1) P \cdot v = RT \quad (14)$$

$$2) (P + p)(v - b) = RT \quad (15)$$

$$3) \left(P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT \quad (16)$$

$$4) \left(P + \frac{a}{v^{5/3}} \right) (v - b)^4 = RTv \quad (17)$$

$$5) \left(P + \frac{v_a}{T v^2} \right) (v - b) = RT \quad (18)$$

$$6) P = \frac{RT(1 - \varepsilon)}{v^2} (v + b) - \frac{a}{v^2} \quad (19)$$

cu

$$a = a_0 \left(1 - \frac{\alpha}{v} \right); \quad b = b_0 \left(1 - \frac{\beta}{v} \right) \text{ și } \varepsilon = \frac{C}{v T^3},$$

unde R , a_0 , α , b_0 , β și C sunt constante caracteristice ale corpului.

$$7) P = RTd + d^2 \{ RT(B_0 + bd) - (A_0 + ad - \alpha ad^4) - \frac{1}{T^2} \times [C_0 - Cd(1 + \gamma d^2) e^{(1-\gamma d^2)}] \} \quad (20)$$

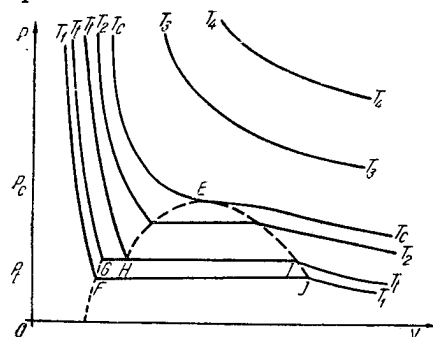


Fig. 6. Reprezentarea prin izoterme a suprafeței de stare: $F(P, v, T) = 0$ (11) T_1-T_2 —izotermă subcritică de comportare apropiată de a gazelor perfecte; T_3-T_4 —izotermă supercritică; T_5-T_6 —izoterma punctului critic; T_7-T_8 —izotermă cu fierbere-condensare; T_9-T_{10} —izotermă transformării prin punctul triplu; $T_1-T_2-T_3-T_4-T_5-T_6-T_7-T_8-T_9-T_{10}$ —izoterma cu sublimare; C—punctul critic; GHI—linia presiunii punctului triplu.

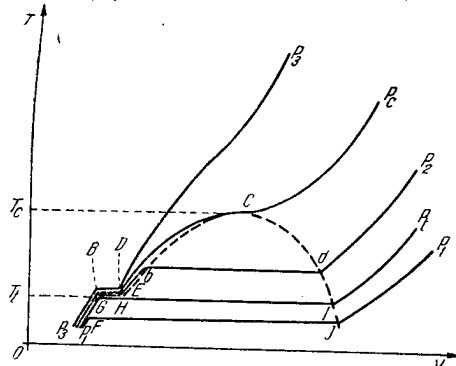


Fig. 7. Reprezentarea prin izobare a suprafeței legii de stare: $F(P, v, T) = 0$ (11); P_1-P_2 —izobară subcritică; P_3-P_4 —izobară apropiată de gazele perfecte; P_5-P_6 —izobară supercritică; P_7-P_8 —izobara punctului critic; P_9-P_{10} —izobară cu fierbere-condensare (ramura stării solide nefigurată din motive grafice); $P_1-P_2-P_3-P_4-P_5-P_6-P_7-P_8-P_9-P_{10}$ —izobara transformării prin punctul triplu; $P_1-P_2-P_3-P_4-P_5-P_6-P_7-P_8-P_9-P_{10}$ —izobară cu sublimare. Poligonul curbiliniei cu două laturi cuprins între HC (între ramura punctată a curbei HCl și izobara critică) reprezintă domeniul de existență al stării lichide, foarte restrâns în această reprezentare.

în care A_0 , a , α , B_0 , b , C_0 , C și γ sînt constante caracteristice, iar e este baza logaritmilor naturali.

$$8) PV = RT + \frac{B}{v} + \frac{C}{v^2} + \frac{D}{v^4} + \frac{E}{v^6} + \frac{F}{v^8} \quad (21)$$

în care B , C , D , E și F sînt funcții numai de temperatură, iar

$$R = \text{const.}$$

$$B = RTB_0 - A_0 - RcT^{-2}$$

$$C = -RTB_0b + A_0a - RB_0cT^{-2}$$

$D = RB_0bcT^{-2}$ și, pentru hidrocarburi, se poate practic considera că $E = F = 0$.

$$9) PV = RT + \frac{\theta}{v} \quad (22)$$

$$\text{cu } \theta = F - gT^{-1} + hT^{-2}$$

unde F , g , h , sînt constante caracteristice corpului.

Aceste ecuații au fost aplicate, practic, exclusiv în domeniul stării gazoase, deși unele din ele pot servi cu aproximație grosolană și în domeniul stării lichide.

Ca ecuații particulare, aplicabile stării lichide s-au propus următoarele ecuații:

$$10) v = v_\infty + \frac{B}{P + C} \quad (23)$$

în care:

v_∞ , B și C sînt funcții exclusiv de temperatură, caracteristice corpului.

$$11) \frac{v_0 - v}{v_0} = C \log \left(1 + \frac{P}{B} \right) \quad (24)$$

în care:

v_0 este volumul specific la presiunea standard;

v — volumul specific la presiunea P ;

C — constantă;

B — funcție de temperatură, caracteristică corpului.

12) V. I. Popovici a propus o ecuație de tipul:

$$\pi = \frac{k(1 - \beta^{1/3})}{\beta \left(\beta^{2/3} - \frac{1}{a} \right)} \quad (25)$$

în care:

$$\pi = \frac{P}{P_0}, \quad P_0 \text{ fiind presiunea de referință};$$

$$\beta = \frac{v}{v_0}, \quad v_0 \text{ fiind volumul specific la presiunea de referință};$$

k și a — coeficienți caracteristici corpului, funcții numai de temperatură.

Se pare că ecuația (25) ar reprezenta cu suficientă aproximație relația (11) atât pentru starea lichidă, cât și pentru cea gazoasă.

13) Pentru lichide se folosește curent în hidrodinamică ecuația (45) din Cap. III, în ipoteză că $\beta = \text{constant}$, ceea ce nu este decât o aproximație (v. IV B.a.2 și B.b.3).

14) Vasilev a propus ecuația

$$\left(P + \frac{a}{v(v+c)}\right)(v+c) = RT \quad (26)$$

în care:

c este o constantă, caracteristică corpului;
 a — funcție liniară de temperatură, caracteristică corpului.

Se cunosc în total peste 150 de ecuații propuse în același scop.

Dintre aceste ecuații se folosește mai frecvent: (14), care pentru corecția abaterilor gazelor reale se completează cu:

$$Pv = ZRT \quad (27)$$

unde Z este un coeficient de abatere de la legea gazelor perfecte, funcție de două dintre variabilele P , v , T , de obicei exprimat ca funcție de P și T , numit uneori și factor de deviere, coeficient de supracompresibilitate, coeficient de compresibilitate (erona*) și reprezentat de obicei grafic (v. fig. 108 și B.d.);

R = constanta legii de stare a corpului respectiv, exprimată în $\frac{\text{m} \times \text{kg}}{\text{kg} \times \text{grad}}$, cu dimensiunile unei energii potențiale specifice.

Ecuația (16), relativ frecvent aplicată, prezintă în general erori care necesită aplicarea de factori de corecție (a se vedea și proprietățile hidrocarburilor cu greutate moleculară mică).

În afară de aceasta, pentru fiecare temperatură cuprinsă între cea critică și aceea a punctului triplu, într-un anumit interval de presiuni, ea nu este univocă, prezentând pentru o singură valoare a presiunii trei rădă-

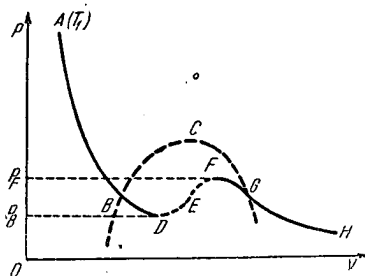


Fig. 8. Comparatie între comportarea $f(P, v)_{T=0}$, reală, la echilibrul stabil și cea indicată de ecuația (16), Van der Waals: ABEQH — comportarea reală, de echilibru stabil; ABDEFGH — comportarea indicată de ecuația (16).

cini pentru volumul specific (v. fig. 8). De exemplu pentru temperatura T_1 , curba reală de comportare este ABGH, pe cînd ecuația (16) indică o comportare după curba ABDEFGH. Totuși comportarea indicată nu este imaginară, stările reprezentate prin ramurile BD și FC putînd fi obținute și experimental sub formă de stări instabile.

*) Se recomandă păstrarea denumirii «coeficient de abatere».

Majoritatea datelor experimentale disponibile (coeficienți ai ecuației de stare) se referă la această formă, deși această lege nu exprimă suficient de exact comportarea reală (v. tabelele 1, 2 și 3).

Tabela 1. Comparatie între comportarea calculată după (16) și comportarea efectivă, a anhidridei carbonice, la temperatura $t = 40^\circ \text{C}$.

P Presiunea în at	Pv calculat cu (16)	Pv experimental	Coeficient de abatere față de (16)
1	25 597	25 574	1,016
10	24 713	24 485	1,010
25	26 060	25 500	1,028
50	19 750	19 000	1,039
80	10 700	9 500	1,127
100	8 890	6 930	1,283
200	14 100	10 500	1,343
500	29 700	22 000	1,350
1 000	54 200	40 000	1,355

Tabela 2. Comparatie între comportarea calculată după (16) și comportarea efectivă a hidrogenului la temperatura $t = 0^\circ \text{C}$

P at	Pv/RT calculat cu (16)	Pv/RT experimental	Coeficient de abatere
1	1,0006	1,0005	1,000
10	1,0061	1,0052	1,001
100	1,062	1,055	1,007
200	1,19	1,14	1,044
400	1,40	1,28	1,094
700	1,75	1,50	1,133
1 000	2,12	1,74	1,218

Tabela 3. Comparatie între comportarea calculată după (16) și comportarea efectivă a azotului la temperatura $t = 0^\circ \text{C}$

P at	Pv/RT calculat cu (16)	Pv/RT experimental	Coeficient de abatere
1	0,9996	0,9995	1,000
10	0,9909	0,9915	0,996
100	0,910	0,970	0,938
200	1,02	0,98	1,04
400	1,30	1,25	1,04
700	1,85	1,66	1,11
1 000	2,43	2,06	1,18

Pentru majoritatea gazelor, în domeniul subcritic coeficientul de abatere față de (16) astfel calculat este totdeauna subunitar, cu excepția azotului.

Tendința de a generaliza ecuația (16) prin aplicarea ei la toate substanțele, prin introducerea coordonatelor reduse, nu constituie decît o aproximație cu totul nesatisfăcătoare, chiar pentru scopuri tehnice.

Luînd pentru mărimile P , v și T , ca unități de măsură, valorile corespunzătoare punctului critic și notînd cu π presiunea redusă P/P_c , cu φ , volumul specific redus v/v_c și cu θ ,

temperatura redusă T/T_c , se obține ecuația (16) sub forma «legii stărilor corespondente»,

$$\left(\pi + \frac{3}{\varphi^2}\right)(3\varphi - 1) = 8\theta, \quad (28)$$

care, însă, nu este exactă, dînd erori relative care pot atinge 20%; de exemplu, pentru

determinate de caracteristicile componentelor, de presiune și temperatură (v. A. c. 1...3) numărul fazelor fiind determinat prin legea fazelor (v. A.b.).

b. Legea fazelor

Într-un sistem multicomponent, numărul de faze, f , prezente este în funcție de:

numărul de componenți chimici distincți, n , și de numărul gradelor de libertate (varianță) ale sistemului, l , care în principiu sînt: libertatea presiunii, libertatea temperaturii și libertatea concentrației fiecăruia dintre componenți în fiecare dintre faze *).

Legea fazelor precizează această legătură prin relația:

$$f + l = n + 2 \quad (30)$$

pentru un sistem oarecare în echilibru chimic, de presiune și de temperatură (un sistem în care nu au loc reacții chimice, în sensul comun, și în care presiunea și temperatura sînt aceleași în toate punctele sistemului).

1. Aplicarea la un sistem unicomponent.

Într-un sistem unicomponent, $n = 1$, iar concentrația (care este ca raportul dintre masa, respectiv numărul de molecule ale componentului, și masa, respectiv numărul de molecule ale sistemului), egală cu unitatea, nu are nicio libertate de variație, astfel încît gradul de libertate al sistemului rămîne determinat de variabilitatea presiunii și a temperaturii. Un astfel de sistem se poate găsi în trei situații **).

a) Cu două grade de libertate, presiunea și temperatura sistemului fiind oarecum și variabile în timp ($l = 2$).

În acest caz, ecuația (30) dă $f + 2 = 1 + 2$, deci, $f = 1$, iar sistemul prezintă o singură fază corespunzătoare domeniului de stabilitate (fig. 1), în care se găsește punctul de coordonate P și T .

b) Cu un grad de libertate, presiunea (de exemplu) fiind oarecare, iar temperatura, funcție de presiune, determinată prin una dintre ramurile de curbă TA , TB sau TC (fig. 1), variabilă în timp ($l = 1$).

* Trebuie observat că nu toate concentrațiile sînt independente între ele, deoarece suma concentrațiilor tuturor componentelor este prin definiție egală cu unitatea, în fiecare dintre faze.

** A se urmări în fig. 1 analiza stărilor sistemului simplu.

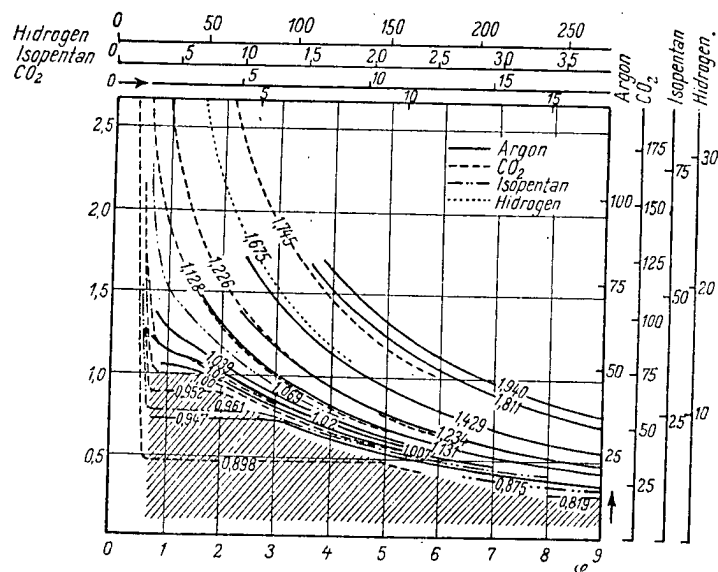


Fig. 9. Reprezentarea în coordonatele π , φ și θ (prin curbe de egal θ) a ecuației generale (28). Scările exterioare dau valorile volumelor specifice și ale presiunilor absolute pentru: hidrogen, argon, izopentan și anhidridă carbonică (valorile din diagramă sînt cele teoretice, diferite de cele experimentale, putînd fi folosite numai ca valori de orientare).

$\pi = \theta = 0$, ecuația dă $\varphi_0 = 1/3$, pe cînd extrapolarea curbelor experimentale tinde către $\varphi_0 = 1/3,75$.

Prin trecerea ei sub forma unei ecuații în serie, corespunzătoare ecuației (21), și luînd un număr mare de termeni, se poate obține o funcție reprezentativă de stare remarcabilă, a cărei exprimare grafică este dată în fig. 10.

O formă analogă ecuației (26) aplicabilă mult mai exact majorității corpurilor, este

$$\left(\pi + \frac{6,2}{\varphi^2}\right)(2,1\varphi - 1) = 8\theta \quad (29)$$

care, însă, în cazul corpurilor cu temperaturi critice foarte joase (He, Ne), dă rezultate inacceptabile. De aceea, se recomandă pe cit posibil evitarea folosirii ei pentru metan.

Pentru același motiv, cu toată abundența relativă de date experimentale după ecuația (16), valabile îndeosebi sub punctul critic, se recomandă să se recurgă totuși la ecuația (27), folosită numai în domeniul existenței de date experimentale pentru Z , și numai în afara acestuia, să se recurgă la ecuația (29).

2. Sisteme multicomponente. Stările de agregare ale sistemelor multicomponente sînt

În acest caz, ecuația (30) dă $f + 1 = 1 + 2$, deci, $f = 2$, iar sistemul prezintă două faze coexistind simultan în echilibru (solid + lichid, în cazul când legătura impusă între temperatură și presiune este cea definită de ramura TB; lichid + gaz, în cazul definirii legăturii prin ramura TC; sau solid + gaz, în cazul legăturii prin ramura TA).

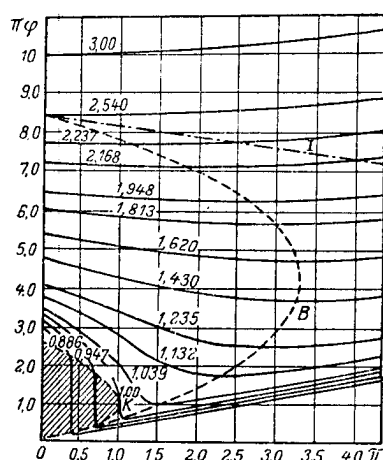


Fig. 10. Representarea în coordonatele $(\pi\phi, \pi)$ a funcției generale (medii) de stare. Curbele figurate reprezintă izotermele temperaturilor reduse, indicate la fiecare curbă. Curba B este locul geometric al punctelor de valoare minimă ale fiecărei izoterme. Curba I este locul geometric al punctelor de comportare ideală pe izoterma respectivă ($\pi\phi = \pi_0\phi_0$).

c) Cu niciun grad de libertate, presiunea și temperatura fiind determinate prin coordonatele punctului comun T al celor trei ramuri de curbă de echilibru, punctul triplu, $l = 0$.

În acest caz, ecuația (30) dă $f + 0 = 1 + 2$, deci, $f = 3$, iar sistemul prezintă trei faze distincte, solid + lichid + gaz, coexistind în echilibru.

2. Aplicarea la un sistem bicomponent.

Într-un sistem bicomponent, $n = 2$, iar concentrațiile componentelor A, respectiv B, în fiecare, i, dintre fazele prezente, sunt z_{iA} și z_{iB} *, legate prin relațiile: $z_{iB} = 1 - z_{iA}$, astfel încât numărul gradelor de libertate posibile nu poate depăși valoarea $2 + f$. În realitate, el este aproape totdeauna mai redus din cauza relațiilor de miscibilitate reciprocă a componentelor în fiecare dintre faze, relații care depind la rândul lor de presiune, de temperatură și de natura componentelor, cum și de limitările introduse de curbele de echilibru între faze.

Într-un astfel de sistem, determinarea numărului de faze exclusiv pe baza legii fazelor nu mai este posibilă, și de obicei, chiar în cazul

când se cunosc relațiile de miscibilitate dintre componentei în diferite faze și curbele de echilibru dintre faze, legea este totuși folosită mai bine în sensul invers: plecând de la cunoașterea numărului de faze prezente în echilibru, se determină gradul de libertate al sistemului. De exemplu:

a) Un sistem binar cu componentii nemiscibili în starea lichidă, în domeniul de temperaturi — presiuni inferioare celor critice ale oricăruia dintre componentei, poate fi reprezentat, din punctul de vedere al comportării de fază, printr-o reprezentare spațială, ca în fig. 11, rezultând din alăturarea în poziție paralelă a unor diagrame plane (de tipul celor din fig. 12) corespunzătoare fiecărei unei presiuni anumite, situate la distanțe egale cu presiunea respectivă, de planul origine $P = 0$. În adevăr, numărul maxim al gradelor de libertate ale sistemului este de trei: presiunea, temperatura și concentrația, ultima numai în domeniul de inexistență a unei faze lichide.

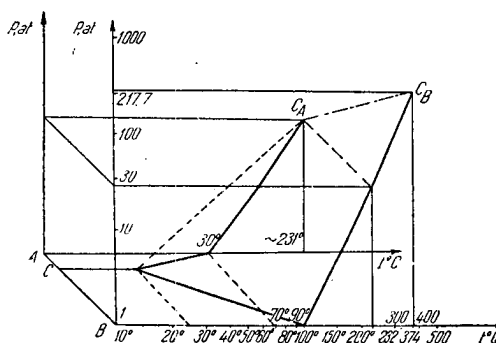


Fig. 11. Representarea în coordonatele: presiune, temperatură și compoziție, a stărilor de fază ale unui sistem binar. Reprezentarea este limitată, pentru simplificare, la temperaturi și la presiuni care nu permit apariția unei faze solide. Cifrele și comportarea se referă aproximativ la sistemul A = normal — hexan și B = apă. C_A = punctul critic al hexanului; C_B = punctul critic al apei; F = punctul de început de fierbere la presiunea atmosferică (temperatura în °C).

În domeniul de existență a unei faze sau a două faze lichide, concentrațiile fazelor lichide sînt fixe și egale pentru fiecare fază lichidă cu 1 dacă nemiscibilitatea este totală*). În conformitate cu legea (30), numărul de faze în echilibru este de $f = n + 2 - l = 2 + 2 - 3 = 1$, o fază gazoasă, în domeniul I (fig. 12), respectiv egal cu $f = 2 + 2 - 2 = 2$ în domeniul II. În acest ultim caz, este prezentă cel puțin o fază lichidă, a doua fiind lichidă sau gazoasă, după cum prin gradele de libertate existente și prin compoziția sistemului, punctul repre-

*) La majoritatea sistemelor reale de acest tip, concentrațiile fazelor lichide sînt foarte apropiate de unitate, totuși inferioare ei, din cauza existenței, în general, a unei miscibilități foarte reduse.

* Exprimat în fracțiuni molare, mol/mol.

zentativ al acestuia se află în domeniul II sau III. La temperaturi joase, care să permită apariția de faze solide, miscibilitatea componentilor fiind, în general, și mai redusă, se vor găsi în prezență tot două faze, în domeniile IV și V.

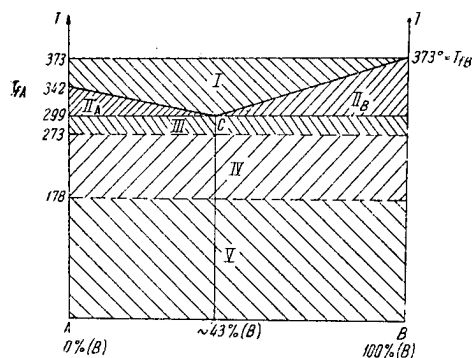


Fig. 12. Reprezentarea comportării izobare de fază a unui sistem binar cu miscibilitate limitată la faza gazoasă. Cifrele și comportarea se referă (aproximativ) la sistemul A = normal-hexan, B = apă. Presiunea izobarei este cea atmosferică:

I — domeniul fazei unice gazoase; II_A — domeniul cu două faze: gazoasă (mixtă) și lichidă (component B); II_B — domeniul cu două faze: gazoasă (mixtă) și lichidă (component A); III — domeniul cu două faze lichide; IV — domeniul cu două faze: lichidă (component A) și solidă (component B); V — domeniul cu două faze solide, separate gravitațional încă înainte de solidificare.

Observație. Figura reprezintă un caz particular: temperatura de topire a componentului B, mai puțin volatil, este inferioară temperaturii de lichefiere a componentului A. În caz contrar, natura fazelor prezente în domeniile II_B și III se schimbă în consecință, fără ca reprezentarea să sufere schimbare de alură.

b) Un sistem binar cu solubilitate integrală în toate stările de agregare, care în consecință, în cea mai mare parte a domeniului de stări, o singură fază mixtă și, după legea (30), trei grade de libertate: presiune, temperatură, concentrație. În domeniile, relativ restrinse, de trecere de la o stare de agregare la alta, coexistă conform curbilor de echilibru I, II, III și IV (fig. 13), câte două faze: lichidă și gazoasă între curbele I și II, respectiv solidă și lichidă între curbele III și IV. Legea (30) precizează că $l = 2$ și în adevăr pentru orice presiune și pentru orice temperatură din acest domeniu, concentrațiile componentelor A și B în fiecare dintre faze sînt determinate de intersecția curbilor I — II sau III — IV, cu dreapta temperaturii alese, $T_i - T_j$, din planul presiunilor alese P_i .

c) Un sistem binar, cu solubilitate totală în starea gazoasă și în cea lichidă și cu nemiscibilitate totală în starea solidă, poate fi analizat în mod analog cu cazurile (1) și (2) (fig. 14), în baza aceleiași relații (30).

În cazul sistemelor cu mai mult decît doi componenți, analiza stărilor de fază se com-

plică din cauza complexității raporturilor de miscibilitate în diferite faze (v. și Cap. IV A.c.2, 3 și 4, și fig. 24 și 25).

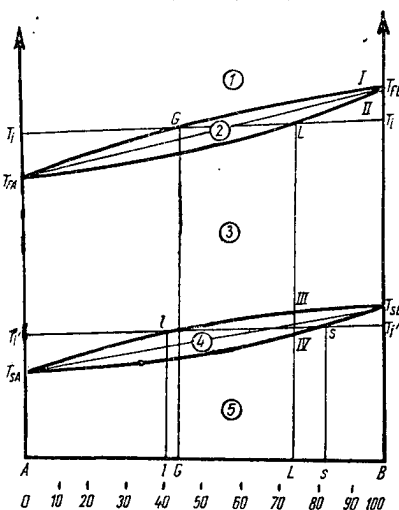


Fig. 13. Reprezentarea comportării de fază, a unui sistem binar cu miscibilitate totală în toate fazele: I — curbă de echilibru determinînd compoziția fazei gazoase în echilibru cu lichid; II — curbă de echilibru determinînd compoziția fazei lichide în echilibru cu vapori^{*)}; III — curbă de echilibru determinînd compoziția fazei lichide în echilibru cu solid; IV — curbă de echilibru determinînd compoziția fazei solide în echilibru cu lichid; G și L — compoziția fazei gazoase, respectiv lichide, în echilibru, la temperatura T_i și la presiunea P_i ; l și s — compoziția fazei lichide, respectiv solide, în echilibru, la temperatura T_j și la presiunea P_j ; 1 — domeniul monofazic, gaz; 2 — domeniul bifazic, gaz + lichid; 3 — domeniul monofazic lichid; 4 — domeniul bifazic, lichid + solid; 5 — domeniul monofazic, solid; T_i — temperaturi de fierbere la presiunea P_i ; T_s — temperaturi de solidificare la presiunea P_i .

^{*)} Observație. În cazul unei comportări de gaz perfect a fazei gazoase și al unei solubilități a gazelor în lichide, variînd linear cu presiunea, curba II este dreaptă dacă suma concentrațiilor este cea molară.

c. — Comportare de fază, echilibru și transformări în echilibru

1. Transformări ce interesează exploatarea țițeiului. Fluidele întîlnite în zăcămintele de petrol și de gaze și în rocile învecinate lor rămîn, în majoritatea cazurilor, ca atare, trecerea lor în stare solidă constituind o excepție. Printre aceste excepții sînt considerate: precipitarea parțială a parafinelor în strat, în zona adiacentă sondei; precipitarea parțială a asfaltenelor în aceeași zonă (studiată teoretic numai în parte).

O comportare analogă, însă, în sfera activității de exploatare a sondelor, o constituie precipitarea pe pereții găurii de sondă și uneori în aparatura de ridicare, a sărurilor din apa extrasă odată cu țițeiul sau cu gazele, și formarea crio-hidraților de gaze în țevile de

extracție (relativ rar) sau în conductele de amestec sau (mai des) de gaze și de gazolină (v. Cap. IV B.d.2.b).

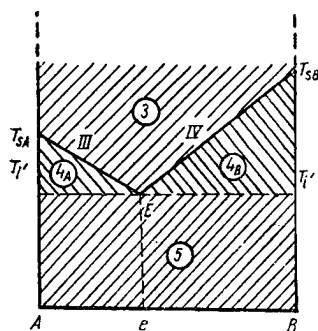


Fig. 14. Reprezentarea comportării izobare de fază a unui sistem binar cu miscibilitate totală în fazele fluide și cu miscibilitate totală în starea solidă: I — curba de echilibru determinând compoziția fazei gazoase în echilibru cu lichid; II — curbă de echilibru determinând compoziția fazei lichide în echilibru cu vapori *); III — curba de echilibru determinând saturația fazei lichide în component A și începutul precipitării acestuia; IV — curba de echilibru determinând saturația fazei lichide în component E și începutul precipitării acestuia; F — punctul eutectic; 1 — domeniul monofazic, gaz; 2 — domeniul bifazic, gaz + lichid; 3 — domeniul monofazic lichid; 4A — domeniul cu lichid (A+B) și solid A; 4B — domeniul cu lichid (A+B) și solid B; 5 — domeniul cu solid (eutectic), A + B și solid A sau B, după cum compoziția globală a sistemului este reprezentată pe axa A—B printr-un punct situat între E și A, respectiv E și B.

* Observație. În cazul unei comportări de gaz perfect a fazei gazoase și al unei solubilități a gazelor în lichide, variind linear cu presiunea, curba II este dreaptă dacă scala concentrațiilor este cea molară.

2. Transformarea gaz-lichid și lichid-gaz, care are loc într-un sistem unicomponent, conform reprezentării din fig. 1 și 5, iar într-un sistem binar cu solubilitate reciprocă totală a celor doi componenți, în ambele faze, poate fi reprezentată complet (inclusiv comportarea de volum specific) numai într-un spațiu cu patru dimensiuni (P, v, T, z), z reprezentând concentrația unuia dintre componenți în tot sistemul, exprimată, de exemplu, molar. În practică, transformările sînt studiate izoterm, izocor sau izobar și, deseori, și cu neglijarea comportării de volum specific.

Transformarea unui sistem cu mai mulți componenți este, în general, reprezentată prin simplificare, prin analogie cu un sistem binar, rareori cu un sistem ternar.

Reprezentarea transformării izobare a unui sistem binar este dată în fig. 13, iar analiza ei poate fi făcută exact pe aceeași cale ca aceea a transformării izoterme respective (fig. 15).

La temperatura de $+4,4^{\circ}\text{C}$, mult sub cea critică a oricărui amestec de propan + butan și la presiunea de 6 kg/cm^2 , un amestec de

40% propan și 60% n-butan se găsește în stare lichidă (punctul A).

La aceeași temperatură și la presiunea absolută, de $0,5\text{ kg/cm}^2$, același amestec se găsește în starea gazoasă.

Prin scăderea presiunii absolute de la 6 la circa $3,35\text{ kg/cm}^2$, amestecul rămîne lichid, la această presiune și la această temperatură amestecul atinge concentrația maximă (a_1) a

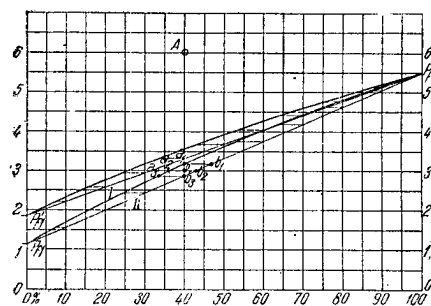


Fig. 15. Reprezentarea comportării izoterme ($t = 4,44^{\circ}\text{C}$) de fază a amestecurilor n-butan + i-butan + propan. Diagrama este construită în ipoteza că componenții se comportă ca gaze perfecte și au o solubilitate în lichid care crește linear cu presiunea: P_{f1} — presiunea de fierbere a n-butanului; P_{fi} — presiunea de fierbere a isobutanului; P_{f2} — presiunea de fierbere a propanului; I — curba-loc geometric al punctelor a_i determinînd compoziția fazei lichide; II — curba-loc geometric al punctelor b_i determinînd compoziția fazei gazoase.

Observația 1. Concentrațiile scării sînt cele molare.

Observația 2. Exactitatea curbelor în regiunile foarte învecinate cu compoziția punctului P_{f2} este redusă din cauza calculului pe baza solubilității liniare în raport cu presiunea.

propanului, posibilă în faza lichidă, se formează prima bulă de fază gazoasă, cu compoziția aproximativă de 47,2% propan (b_1). Prin formarea acestei prime cantități de fază gazoasă, mai bogată în propan decît faza lichidă de proveniență, aceasta sărăcește în propan, iar punctul ei reprezentativ se deplasează către stînga (și în jos, cu scăderea presiunii), către poziția a_2 . La presiunea absolută de $3,00\text{ kg/cm}^2$, de exemplu, concentrația propanului în faza lichidă este de $\approx 36,2\%$, în faza gazoasă este de $\approx 42,8\%$, iar raportul dintre cantitățile de fază gazoasă și de fază lichidă este de $\frac{a_2 0}{0b} \approx \frac{40 - 36,2}{42,8 - 40} = 1,357:1$ (*), conform relației de recurență:

$$\frac{n_G}{n_L} = \frac{z - x}{y - z} \quad (31)$$

* Dată fiind determinarea indirectă, prin raportul unor diferențe, valoarea raportului este mult alterată de eventualele erori comise în citirea concentrațiilor x și y .

în care:

- n_G/n_L este raportul dintre numărul de molecule (sau $k \cdot \text{moli}$) prezente în faza gazoasă, respectiv lichidă;
- z — concentrația componentului mai volatil în întregul sistem, în mol/mol;
- x — concentrația componentului mai volatil în faza lichidă, în mol/mol;
- y — concentrația componentului mai volatil în faza gazoasă, în mol/mol.

Prin scăderea mai departe a presiunii, punctele a_i de concentrație limită (superioară) a propanului în faza lichidă și b_i de concentrație limită (superioară) a butanului în faza gazoasă

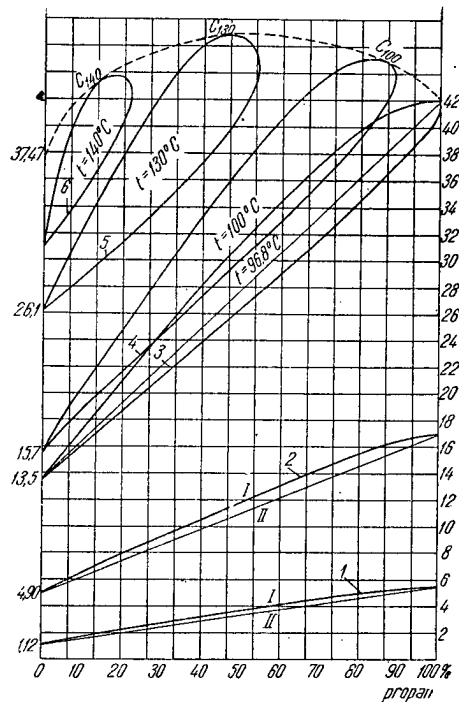


Fig. 16. Reprezentarea comportării de fază în domeniul stărilor fluide, a unui sistem binar cu miscibilitate totală (comportarea aproximativă a sistemului propan + n-butan). Curbele 1 = izotermele I (lichid) și II (gaz) pentru temperatura de 4°C (ca în fig. 15); Curbele 2 = izotermele I (lichid) și II (gaz) pentru temperatura de 50°C; Curbele 3 = izotermele I (lichid) și II (gaz) pentru temperatura de 96,8°C (critică pentru propan); Curbele 4 = izotermele I (lichid) și II (gaz) pentru temperatura de 100°C; Curbele 5 = izotermele I (lichid) și II (gaz) pentru temperatura de 130°C; Curbele 6 = izotermele I (lichid) și II (gaz) pentru temperatura de 140°C; C_p — punctul critic al propanului; C_B — punctul critic al n-butanului (~152°C); C_{100} — punctul critic al sistemului propan-butan la $t^\circ = 100^\circ\text{C}$; C_{130} — punctul critic al sistemului propan-butan la $t^\circ = 130^\circ\text{C}$; C_{140} — punctul critic al sistemului propan-butan la $t^\circ = 140^\circ\text{C}$.

Observație. Din cauza dificultăților experimentale, presiunile și compozițiile din zona punctelor critice sînt afectate de erori relative de ordinul 0—0,05.

descriu curbele I și II (fig. 15), de început de fierbere, respectiv de început de condensare.

Prin ridicarea temperaturii, curbele I și II se deplasează (la temperaturi joase, aproape prin translație, iar la temperaturi înalte, cu deformări din ce în ce mai pronunțate în regiunea în care presiunea de fierbere a componentului mai volatil se apropie de presiunea critică a celui component, respectiv temperatura sistemului se apropie de temperatura critică a celui component), în sus, către presiunile mari. De îndată ce temperatura sistemului depășește temperatura critică a celui mai volatil component, punctul P_{f_2} din fig. 15 devine imaginar, iar curbele I și II se racordează într-o buclă (fig. 16), ale cărei ramuri I și II sînt delimitate de punctul C, punctul critic al sistemului binar respectiv pentru temperatura respectivă.

Reprezentarea completă a comportării de fază a sistemului în același domeniu, în sistemul de coordonate: P, t , compoziție, poate fi făcută ca în fig. 17, prin juxtapunerea la distanțe de origine proporționale cu temperaturile respective, a planelor conținând diferitele izoterme, sau, în mod analog, prin juxtapunerea la distanțe de origine proporționale cu presiunile respective, a planelor conținând diferitele izobare.

Din studiul datelor experimentale se pot trage următoarele concluzii, practic, generale, pentru sistemele binare de hidrocarburi:

a) Sistemul admite un punct critic cu o presiune în general superioară presiunilor critice ale componentilor, cu atît mai mult cu cît componenții sînt mai diferiți ca greutate moleculară (și, în general, și ca presiune critică) (v. și fig. 25).

b) Temperatura critică a unui amestec de orice compoziție este, practic totdeauna, cuprinsă între temperaturile critice ale componentilor (v. și fig. 25).

Pinza superioară a suprafeței închise din fig. 17, generată prin curbele II, delimitează în fig. 17, deasupra ei (cître temperaturile mai mari) domeniul de existență a fazei gazoase unice.

Pinza inferioară a aceleiași suprafețe, generată de curbele I, delimitează dedesubtul ei (cître presiunile mai mari) domeniul de existență a fazei lichide unice.

Între cele două pinze, în interiorul suprafeței închise, coexistă în echilibru o fază lichidă și una gazoasă.

Separația dintre ramurile I și II de curbă de echilibru este realizată de punctele cu compoziția de 0% și de 100% în unul dintre componenți, la presiuni, respectiv la temperaturi, mai mici decît cea mai joasă dintre presiunile, respectiv temperaturile, critice ale componenților. Deasupra acesteia, delimitarea dintre curbele I și II este realizată de punctul critic al sistemului, corespunzător temperaturii de studiu, dacă aceasta este studiată prin izo-

terme, respectiv, corespunzător presiunii, în cazul studiului prin izobare, respectiv compoziției, în cazul studiului sistemelor de compoziție cunoscută.

Spre deosebire de definiția punctului critic, care reiese evident din analiza fig. 1 și fig. 2, definiție frecvent întâlnită în practică și valabilă numai pentru sistemele cu un singur component

obținându-se o diagramă de tipul aceleia din fig. 18.

Curba I delimitează presiunile minime (în cazul transformărilor izoterme) sau temperaturile maxime, în cazul transformărilor izobare, la care sistemul dat se prezintă exclusiv în stare lichidă, pe ramura ei de «comportare normală» a sistemului, cuprinsă între C_p și

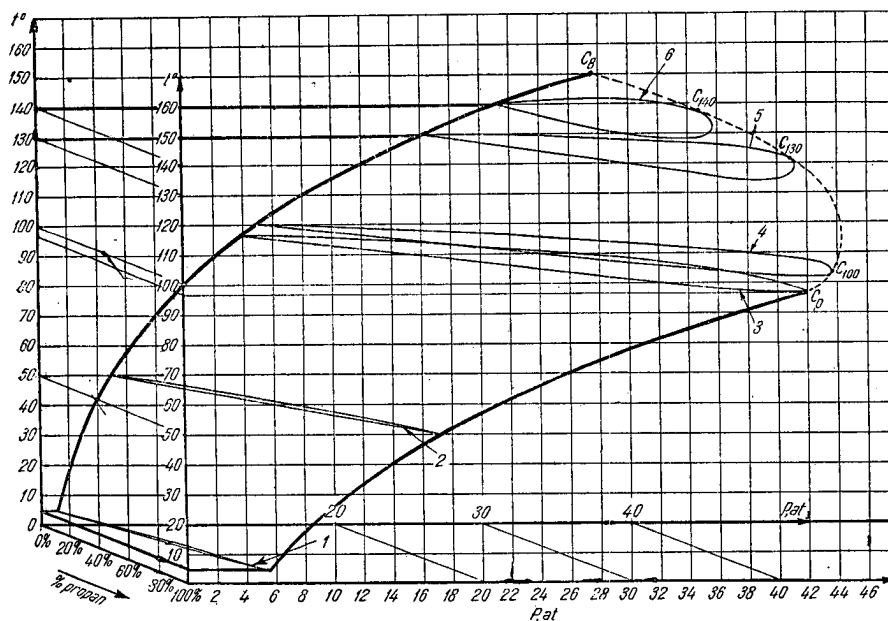


Fig. 17. Reprezentarea comportării de fază în sistemul de coordonate: presiune, temperatură și compoziție, în domeniul stărilor fluide, a unui sistem binar cu miscibilitate totală (comportarea aproximativă a sistemului propan n-butan).
Observație. Notațiile sînt aceleași ca în fig. 16.

(punctul critic este definit prin temperatura deasupra căreia corpul nu mai poate fi adus în stare lichidă, oricît i s-ar ridica presiunea, și prin presiunea corespunzătoare de echilibru), în cazul sistemelor binare, punctul critic este definit cu ajutorul analizei din fig. 3, și anume, el este punctul determinat de presiunea și de temperatura la care volumul specific (în particular, și toate celelalte proprietăți fizice, în general) este același atât în faza lichidă, cit și în cea gazoasă (v. și fig. 3). La presiuni și la temperaturi mai mari decît aceasta, un sistem cu aceeași compoziție se găsește într-o fază unică, numită, în mod convențional, gazoasă.

3. Sisteme binare cu compoziție globală fixă. În studiul zăcămintelor se cercetează în cazuri concrete comportarea de fază a unui amestec cu compoziție dată. Pentru aceasta, se intersectează suprafața din fig. 17 cu plane paralele cu planele (P, T), corespunzătoare fiecărei unei anumite compoziții a sistemului,

punctele corespunzătoare temperaturilor mai joase decît T_p . Punctul C_p , caracterizat prin presiunea maximă la care sistemul mai poate fi ținut integral în stare lichidă (sau mai exact, în echilibru, cu o cantitate infinit mică de gaz), este numit «cricondenbar». Arcul $C_p C'$ al aceleiași curbe I reprezintă ramura de «comportare retrogradă» la răcire izobară a sistemului.

Curba II delimitează temperaturile minime (în cazul transformărilor izobare) sau presiunile minime (în cazul transformărilor izoterme), la care sistemul mai poate fi ținut integral în starea gazoasă (sau, mai exact, în echilibru cu o cantitate infinit mică de lichid), pe ramura ei de «comportare normală». Punctul CT, caracterizat prin temperatura maximă la care sistemul dat mai poate prezenta o cantitate oricît de mică de lichid în echilibru cu gaz, este numit «cricondenterm». Punctul C este punctul critic definit prin identitatea proprietăților fizice ale celor două faze și prin confundarea acestora.

posibilă este condensarea). Prin opoziție, se numește comportare retrogradă transformarea inversă de fază, produsă de aceeași transformare de presiune, respectiv de temperatură, din cazul comportării normale (condensare prin detentă izotermă sau prin încălzire izobară, respectiv vaporizare prin compresie izotermă sau prin răcire izobară).

În fig. 18, 19 și 20 sînt reprezentate încălzirile izobare la presiuni superioare celei critice, $ABDEF$, și detentele izoterme la temperaturi superioare celei critice, $QHJK$, care în aceste domenii prezintă comportare retrogradă pe o parte a parcursului transformării.

Din examinarea curbelor de egal procent molar de lichid rezultă că:

— în fig. 18, pe segmentul BD , are loc o scădere a procentului de lichid (comportare normală);

— în fig. 18, pe segmentul DE , are loc o creștere a procentului de lichid (comportare retrogradă);

— în fig. 18, pe segmentul HI , are loc o creștere a procentului de lichid (comportare retrogradă);

— în fig. 18, pe segmentul IJ , are loc o scădere a procentului de lichid (comportare normală);

— în fig. 19, pe segmentul BD , are loc o creștere a procentului de lichid (comportare retrogradă);

— în fig. 19, pe segmentul DE , are loc o scădere a procentului de lichid (comportare normală);

— în fig. 19, pe segmentul HI , are loc o creștere a procentului de lichid (comportare retrogradă);

— în fig. 19, pe segmentul IJ , are loc o scădere a procentului de lichid (comportare normală);

În toate cazurile examinate, comportarea retrogradă este o condensare retrogradă. Dacă se examinează în fiecare dintre aceste cazuri transformarea cu variația în sens invers a presiunii, respectiv a temperaturii, se întâlnește vaporizarea retrogradă în toate cazurile de comportare retrogradă.

Pentru valabilitatea considerațiilor de mai înainte este necesar:

a) ca transformarea de temperatură sau de presiune să afecteze una singură dintre aceste mărimi (chiar în cazul comportării normale, efectul creșterii lor asupra transformărilor de fază fiind contrariu), efectul rezultat nu poate fi comparat cu variația fiecăreia dintre ele, deoarece acestea au dimensiuni diferite;

b) punctele inițiale și cele finale ale transformărilor, A , E , G și K , trebuie să fie foarte apropiate de ramura respectivă a curbei I - II care delimitează domeniul bifazic (în orice caz, mult mai apropiate decît punctul critic), deoarece, în caz contrar, calificarea de «gaz» sau de «lichid» a sistemului în starea

din punctul respectiv este convențională și lipsită de semnificație fizică.

Din analiza curbelor de egal conținut molar de lichid în sistem se poate deduce că în punctele în care izoterma sau, respectiv, izobara transformării ajunge tangentă la una dintre curbele de egal conținut de lichid, punctele D și I , caracterul transformării de fază se schimbă (condensare \rightarrow vaporizare; normală \leftrightarrow retrogradă). Domeniul în care poate avea loc o comportare retrogradă efectivă este limitat între punctul D (pentru izobară), respectiv I (pentru izotermă), și punctul de intersecție, B sau E , (și anume, cel mai apro-

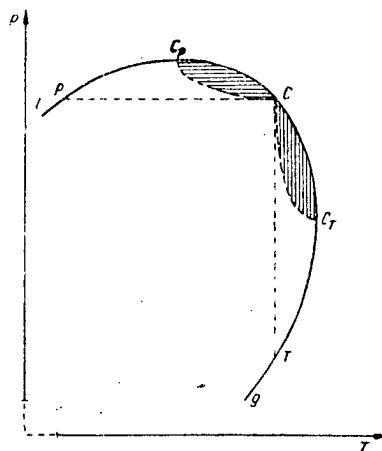


Fig. 21. Reprezentarea domeniilor de comportare retrogradă a sistemului binar de compoziție dată, din fig. 18. Curba întreruptă CC_p este locul geometric de tangență între curbele de egal conținut molar de lichid și dreptele izobare. Curba întreruptă CC_T este locul geometric de tangență între curbele de egal conținut molar de lichid și dreptele izoterme. Notății ca în fig. 18.

piat de punctul critic) în cazul izobarei, respectiv H sau J , (cu aceeași precizare) în cazul izotermei.

Domeniul de comportare efectivă retrogradă este delimitat, astfel, de ramura de curbă I sau II , CC_p , în cazul transformărilor izobare, și CC_T , în cazul transformărilor izoterme, pe de o parte, și de arcul de curbă CC_p , loc geometric al punctelor de tangență D , în cazul transformării izobare, respectiv arcul de curbă CC_T , loc geometric al punctelor de tangență I , în cazul transformării izoterme (domeniile hașurate în fig. 21, 22 și 23), pe de altă parte.

Afirmația că domeniul de comportare retrogradă ar fi cuprins în tot segmentul de curbă I - II subînțins de coardele presiunii critice CP , respectiv ale temperaturii critice CT , întâlnită în câteva tratate de largă răspîndire, este eronată deoarece:

— transformările elementare care au loc în porțiunea exterioară (din punct de vedere al

curburii) curbelor CC_p și CC_T din fig. 21, 22 și 23 sînt exclusiv transformări cu comportare normală de fază;

— fazele în echilibru în acest domeniu pot fi considerate fie ca rezultatul unei succesiuni de transformări (una retrogradă, excedentară, și alta normală, deficitară), fie, mai simplu,

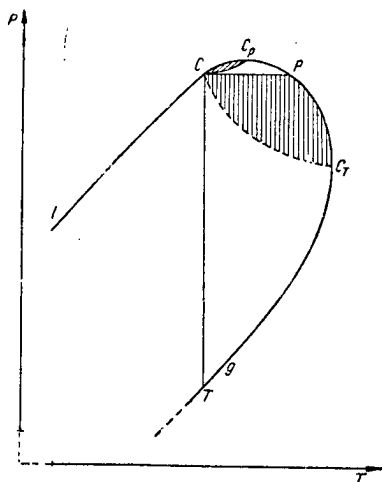


Fig. 22. Reprezentarea domeniilor de comportare retrogradă a sistemului binar de compoziție dată, din fig. 19. Curba întreruptă CC_p este locul geometric de tangență între curbele de egal conținut molar de lichid și dreptele izobare. Curba întreruptă CC_T este locul geometric de tangență între curbele de egal conținut molar de lichid și dreptele izoterme. Notății ca în fig. 19.

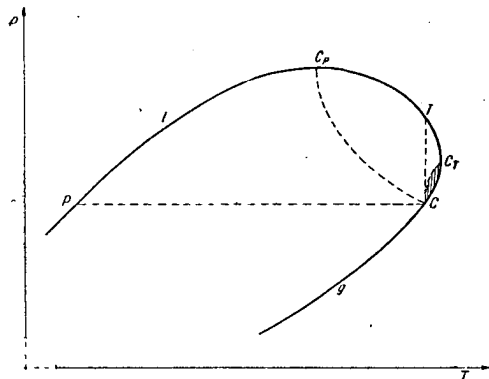


Fig. 23. Reprezentarea domeniilor de comportare retrogradă a sistemului binar de compoziție dată, din fig. 20. Curba întreruptă CC_p este locul geometric de tangență între curbele de egal conținut molar de lichid și dreptele izobare. Curba întreruptă CC_T este locul geometric de tangență între curbele de egal conținut molar de lichid și dreptele izoterme. Notății ca în fig. 20.

ca rezultatul unei singure transformări cu comportare normală de fază, după sensul variației de presiune, respectiv de temperatură, prin care se ajunge în punctul considerat.

Determinînd experimental curbele din fig. 18, 19 și 20 pentru fiecare compoziție a siste-

mului binar studiat și reprezentîndu-le în aceeași diagramă (P, T), se obține o reprezentare de natura aceeași din fig. 24. Ramurile de curbă I-II, confundate una cu alta în cazul amestecurilor cu compoziția de 100% component A sau de 100% component B, se depărtează una de alta în domeniul concentrațiilor comparabile, prezentîndu-se sub forma din fig. 18 (respectiv fig. 21) sau fig. 19 (respectiv fig. 22) și, mai rar, fig. 20 (respectiv fig. 23).

În fig. 24, curba $C_1C_2C_3\dots C_7$, locul geometric al punctelor critice ale sistemelor de diferite compoziții, coincide practic, din motive grafice, cu înfășurătoarea curbelor 1...7. Teoretic ele diferă puțin.

Într-o diagramă analoagă se pot grupa comportările diferitelor familii de sisteme binare constituite din termenii omologi ai unei serii, obținîndu-se o diagramă ca aceea din fig. 25.

4. Sisteme ternare. Pentru analiza comportării unui sistem cu trei componenți, reprezentările grafice folosite la analiza comportării sistemelor cu unul sau cu doi componenți devin insuficiente. În comparație cu cazul sistemului binar (fig. 17), în acest caz intervin în plus încă două concentrații (o singură variabilă independentă în plus, deoarece $\Sigma c = 1$), astfel încît ar fi necesar pentru reprezentare un spațiu cu patru dimensiuni. În cazuri particulare (doi dintre componenți fiind izomeri cu proprietăți fizice foarte apropiate), se încearcă asimilarea sistemului cu un sistem binar, în care unul este componentul mai deosebit, iar celălalt este un component fictiv mediu (cazul propan-butan, fig. 15). Se recomandă să se evite folosirea acestui artificiu, deoarece, uneori, amestecul de izomeri prezintă față de fiecare dintre aceștia deosebiri de comportare de fază mai mari chiar decît deosebirile dintre izomeri. Folosirea acestui artificiu trebuie limitată la prevederea comportării prin interpolare în game foarte restrînse.

Din cauza limitării numărului de parametri independenți, reprezentabili grafic, la trei (prin coordonate spațiale sau, în plan, prin curbe — loc geometric de egală valoare a celui de al treilea parametru), se recurge la analiza parțială pentru studiul sistemelor cu trei componenți. În mod frecvent, comportarea la diferite temperaturi constante se reprezintă prin diagrame separate (v. fig. 31). Pentru reprezentarea compoziției se face uz de constanța sumei perpendicularelor duse dintr-un punct interior pe laturile unui triunghi echilateral și de egalitatea ei cu înălțimea, pentru a reprezenta cele trei concentrații (fig. 26).

Pentru studiul sistemului ternar ales (de exemplu, metan + etan + n-pentan), se determină pentru temperatura aleasă (de exemplu, $37,38^\circ\text{C}$), la presiune aleasă (de exemplu $36,15 \text{ kg/cm}^2$) comportarea de fază pentru diferite compoziții ale sistemului (fig. 27); se repetă studiul la aceeași temperatură și la o nouă presiune (de exemplu, $70,3 \text{ kg/cm}^2$, fig. 28)

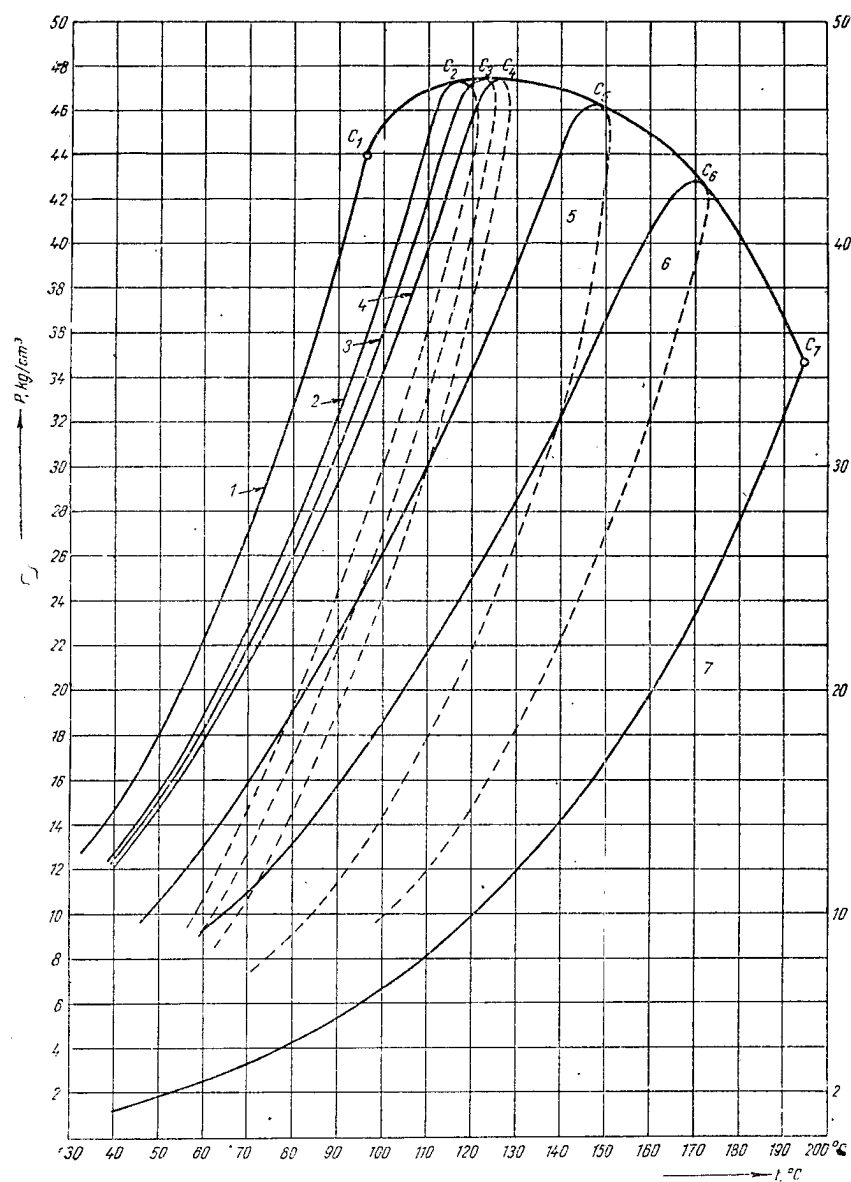


Fig. 24. Reprezentarea în coordonatele (P, t°) , a comportării de fază a sistemelor binare propan + n pentan, de diferite compoziții: 1—curba de echilibru a sistemului cu concentrație globală 0,000 pentan; 2—curba de echilibru a sistemului cu concentrație globală 0,1387 pentan; 3—curba de echilibru a sistemului de concentrație globală 0,1810 pentan; 4—curba de echilibru a sistemului cu concentrație globală 0,2079 pentan; 5—curba de echilibru a sistemului cu concentrație globală 0,4443 pentan; 6—curba de echilibru a sistemului cu concentrație globală 0,6506 pentan; 7—curba de echilibru a sistemului cu concentrație globală 1,0000 pentan. Concentrațiile sînt exprimate în raporturi molare. $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ și C_7 sînt puncte critice ale amestecurilor de compoziție respectivă.

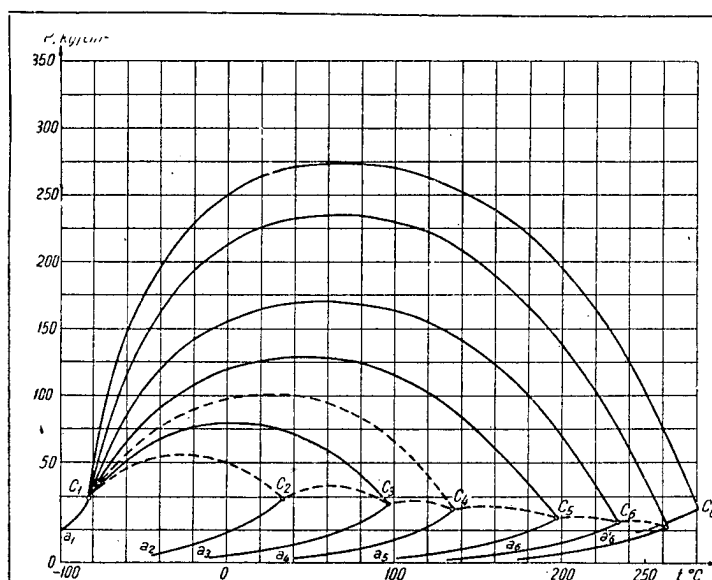


Fig. 25. Reprezentarea în coordonatele (P, t) , a limitelor domeniilor de comportare de fază ale sistemelor binare compuse din hidrocarburi parafinice inferioare și din ciclohexan.: $a_i C_i$ — curba tensiunii de vapori a hidrocarburi parafinice $C_i H_{2i+2}$; $a_6 C_6$ — curba tensiunii de vapori a ciclohexanului; $C_i C_j$ — curba punctelor critice ale sistemelor (de compoziție variabilă)

$C_i H_{2i+2} + C_j H_{2j+2}$.
Observație. Punctele de pe curbele $C_i C_j$, din apropierea punctului C_i , sînt determinate prin interpolare pentru temperaturile de sub -20°C pînă la -10°C . Idem în ce privește întreaga curbă $C_i C_j$.

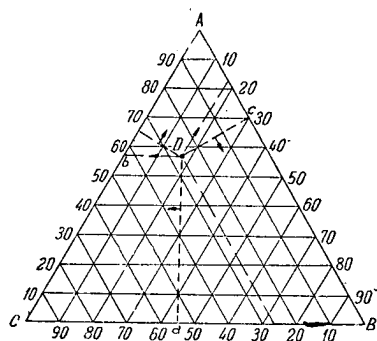


Fig. 26. Reprezentarea compoziției unui sistem ternar: $z_A = Da$ — concentrația sistemului component A, egală cu 56,66%, se citește pe scala CA; $z_B = Db$ — concentrația sistemului în component B, egală cu 16,67%, se citește pe scala AB; $z_C = Dc$ — concentrația sistemului în component C, egală cu 26,67%, se citește pe scala BC.

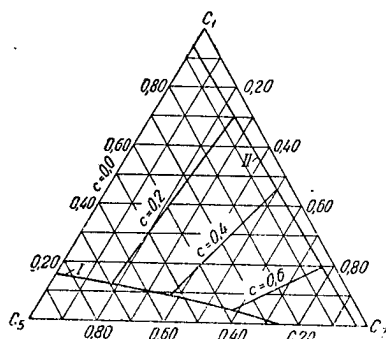


Fig. 27. Reprezentarea comportării de fază a unui sistem ternar la presiune și la temperatură constantă, în funcție de compoziție (sistemul: metan + etan + n-pentan, la $37,78^\circ\text{C}$ și la $35,15 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$): $c = \frac{x_2}{x_2 + x_3}$, x_2 și x_3 fiind concentrațiile etanului, respectiv ale pentanului în faza lichidă.

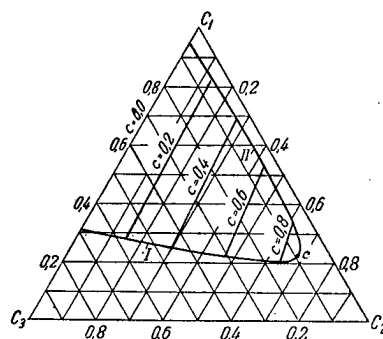


Fig. 28. Reprezentarea comportării de fază a unui sistem ternar la presiune și la temperatură constantă, în funcție de compoziție (sistemul: metan + etan + n-pentan la $37,78^\circ\text{C}$ și la $70,30 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$): $c = \frac{x_2}{x_2 + x_3}$, x_2 și x_3 fiind concentrațiile etanului, respectiv ale pentanului în faza lichidă.

și așa mai departe, la presiuni care cresc treptat (fig. 29 și 30), până când, la temperatura aleasă, sistemul se găsește, indiferent de compoziție, integral în starea (convențională) gazoasă. Prin suprapunerea acestor diagrame

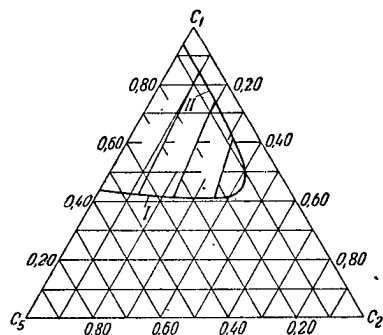


Fig. 29. Reprezentarea comportării de fază a unui sistem ternar la presiune și la temperatură constantă, în funcție de compoziție (sistemul + metan + etan + n-pentan la 37,78°C și la 105,45 kg/cm² abs): $c = \frac{x_2}{x_2 + x_3}$, x_2 și x_3 fiind concentrațiile etanului, respectiv, ale pentanului în faza lichidă.

plane la cote (deasupra planului $P = 0$) egale cu presiunile respective, se obține diagrama din fig. 31.

În cazul apariției la temperaturi (și eventual, a presiuni) joase a unor fenomene de mis-

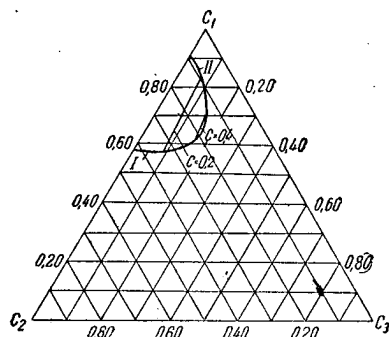


Fig. 30. Reprezentarea comportării de fază a unui sistem ternar la presiune și la temperatură constantă, în funcție de compoziție (sistemul metan + etan + n-pentan, la 37,78°C și 140,60 kg/cm² abs.) $c = \frac{x_2}{x_2 + x_3}$, x_2 și x_3 fiind concentrațiile etanului, respectiv ale pentanului în faza lichidă.

bilitate limitată între cei doi sau cei trei componenți, în faza lichidă sau (și) în faza solidă, alura diagramei corespunzătoare fig. 31 se schimbă, luând aspecte foarte variate, care pot fi studiate și reprezentate prin aceleași metode. Atât în aceste cazuri, cât și în cazul sistemelor cu patru sau cu mai mulți componenți, pe măsura complicării fenomenelor, utilitatea practică a reprezentărilor grafice se reduce

din ce în ce, tinzând către simpla valoare de orientare semicantitativă sau chiar calitativă, fiind necesar a le completa cu tabele numerice

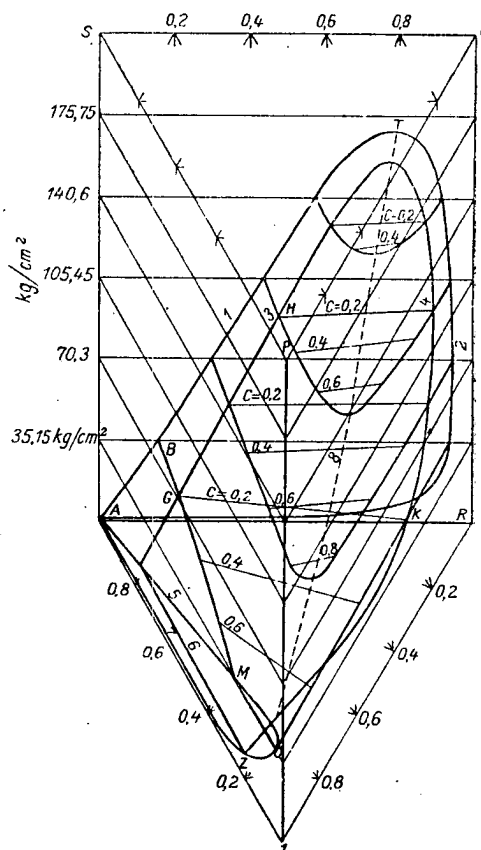


Fig. 31. Reprezentarea comportării de fază a unui sistem ternar la temperatură constantă. Sistemul metan + etan + n-pentan la $t = 37,78^\circ\text{C}$: 1 — curba de început de fierbere (sfârșit de condensare) a sistemului metan + n-pentan; 2 — curba de sfârșit de fierbere (început de condensare) a sistemului metan + n-pentan; 3 — curba de început de fierbere (sfârșit de condensare) a sistemului metan + n-pentan + etan ($c = 0,2$); 4 — curba de sfârșit de fierbere (începutul de condensare) a sistemului metan + n-pentan + etan ($c = 0,2$); 5 — curba de început de fierbere (sfârșit de condensare) a sistemului etan + n-pentan; 7 — drepte de referință în (5 + 6 pentru $c = 0,2$; 8 — locul geometric al punctelor critice ale sistemului, pentru temperatura de 37,78°C; $c = \frac{x_2}{x_2 + x_3}$, x_2 și x_3 fiind concentrațiile etanului, respectiv ale pentanului în faza lichidă.

de comportare parțială, cu unul sau cu mai multe dintre gradele de libertate ale sistemului, suprimate.

d. — Comportare de volum. Volume specifice. Greutăți specifice

Deosebirea de comportare de fază dintre sistemele cu un component și acelea cu mai mulți componenți are drept consecință imposi-

bilitatea practică de a mai determina analitic o lege de natură celei exprimate prin relațiile (11)...(29), care să fie valabilă oricât de aproximativ în tot domeniul (P , T) și pentru orice compoziție, chiar a unui sistem binar.

Analiza comportării de volum specific a unui sistem binar poate fi făcută mai ușor în comparație cu aceea a unui sistem cu un sin-

mai ales în regiunea punctului critic, deoarece curba de 50% lichid nu este riguros dreaptă.

Palierile de presiune constantă de vaporizare-condensare izotermă sint date de curba $P_f = \varphi(t^\circ)$ a tensiunii de vaporori.

În comparație cu aceasta, comportarea corespunzătoare a unui sistem binar cu solubilitate totală, cu compoziție dată, se poate reprezenta ca în fig. 33.

Spre deosebire de cazul sistemului cu un singur component, se observă:

— variația presiunii în cursul vaporizării (scădere), respectiv al condensării (creștere) izoterme (sensurile indicate se referă numai la domeniul « comportării normale » de fază);

— poziția diferită a punctelor: C , punctul critic, C_p , punctul de presiune maximă la care mai poate exista o fază lichidă (cricondenbar) și C_t , punctul de temperatură maximă la care mai poate exista o fază lichidă (cricondenterm);

— numai într-un domeniu destul de restrâns al presiunilor joase, repartiția curbelor loc geometric de egal procentaj de lichid, este aproximativ uniformă de-alungul arcului de condensare izotermă AB care are o curbura foarte mică, ceea ce indică și constanța aproximativă în cursul condensării, a căldurii latente de condensare și respectarea aproximativă a legii de solubilitate a fazei gazoase în cea lichidă, proporțională cu presiunea (v. IV A.c.1).

Comportarea normală de fază, respectiv retrogradă, poate fi urmărită și în fig. 32 și 33, cu ajutorul curbe-

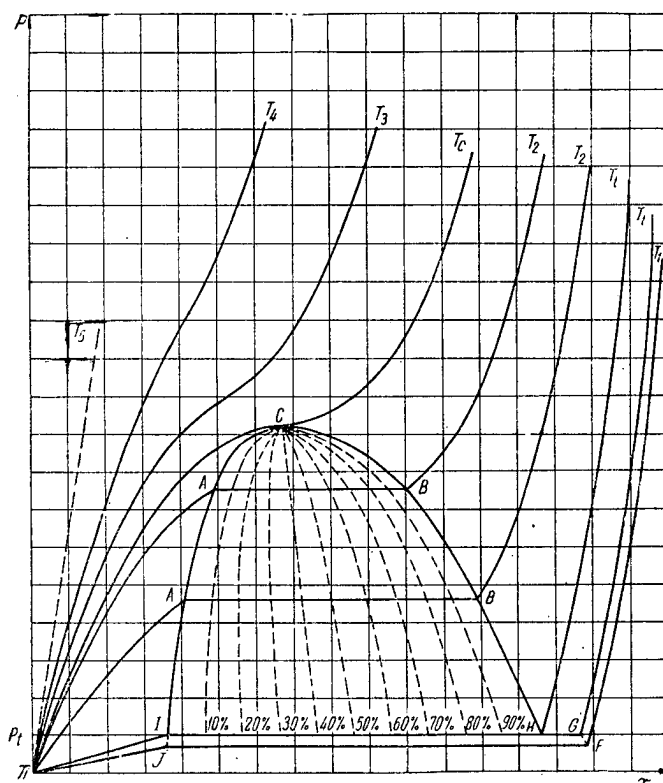


Fig. 32. Reprezentarea comportării de volum a unui sistem cu un singur component prin curbe de variație a greutății specifice, în funcție de presiune, la temperaturi constante: $T_1 J F T_1$ — izoterma sub punctul triplu (sublimare); $T_1 I Q H T_1$ — izoterma punctului triplu; $T_1 A B T_1$ — izotermă subcritică (cu vaporizare-condensare); $T_1 C T_1$ — izoterma critică; $T_1 T_2$ și $T_1 T_3$ — izotermă supercritică; $T_1 T_4$ — izoterma unui gaz perfect deasupra punctului critic.

gur component, analizând în locul volumului specific $v = f(P, t^\circ)$, valoarea sa reciprocă, greutatea specifică, $\gamma = \varphi(P, t^\circ)$. Pentru sistemul cu un singur component, reprezentarea funcției poate fi făcută ca în fig. 32.

Se observă constanța presiunii în cursul vaporizării, respectiv al condensării izoterme, rectilinitatea practică a izotermelor în domeniul stării gazoase la temperaturi și la presiuni joase, cum și cumulara de către punctul C a însușirilor de punct critic, « cricondenterm » și « cricondenbar ».

Legea diametrului liniar v. și fig. 3 (Cailletet și Mathias) nu este satisfăcută decât aproximativ,

lor de egal procentaj de fază lichidă. În zona dintre C_t și C , izotermele traversează această familie de curbe în sensul unei scăderi a procentajului de fază lichidă la creșterea izotermă a presiunii (vaporizare retrogradă izotermă, respectiv condensare la scăderea presiunii).

În zona dintre C și C_p , izobarele traversează familia de curbe de procentaj în sensul unei scăderi a conținutului de lichid la scăderea izobară a temperaturii (vaporizare retrogradă izobară, respectiv condensare, în cazul creșterii temperaturii).

O reprezentare intuitiv mult mai completă poate fi făcută prin reprezentarea spațială, ca

în fig. 34 (în locul figurii 32) și fig. 35 (în locul figurii 33).

Fig. 34 este analizată prin secțiuni plane de $T = \text{const.}$ (izoterme). Ea poate fi analizată și prin secțiuni plane de $P = \text{const.}$ (izobare), de exemplu izobara supercritică $KGHJ$, însă această analiză nu aduce elemente noi.

În cazul fig. 35, analizată tot prin izoterme, trecerea la analiza prin izobare aduce unele detalii, îndeosebi în domeniul de comportare retrogradă izobară din regiunea $C_p C$.

În cazul fig. 35, avantajul reprezentării spațiale constă în modul de a exprima vizibil condiția de egalitate de volum specific (respectiv greutate specifică) a fazelor în echilibru, care definește punctul critic, cum și însușirile particulare menționate, care definesc punctele cricondenterm și cricondenbar. De asemenea, ea exprimă intuitiv principiul unității de fază a stării fluide, prin posibilitatea de a găsi o infinitate de transformări continue între o stare lichidă și o stare de vapori saturanți, prin deplasarea punctului reprezentativ de stare pe suprafața $\gamma = f(P, T)$, satisfăcând singura condiție de a nu atinge curba BCA , adică trecind prin domeniul temperaturilor și al presiunilor supercritice.

Pentru reprezentarea completă a funcției de stare (11) a unui astfel de sistem binar, sînt necesare reprezentări analoage celei din fig. 35, corespunzătoare fiecărei compoziții posibile a sistemului, practic, de exemplu, 10% A + 90% B, 20% A + 80% B etc.

În practică s-a evitat, în general, o astfel de procedură, din cauza imperfecției reprezentării unui sistem multicomponent printr-un sistem binar, în comparație cu volumul necesar de lucrări.

Utilitatea ei este însă reală în cazul sistemelor multicomponente, ai căror componenți (chimic înrudiți) pot fi grupați după greutatea moleculară în două game restrînse, relativ depărtate una de alta.

e. — Comportare de compoziție

Comportarea din punctul de vedere al compoziției fazelor în echilibru este evidentă în cazul sistemelor cu un singur component, la care compoziția chimică a fazelor în echilibru este aceeași și identică cu cea globală a sistemului. În cazul sistemelor binare, ea este determinată (v. IV A.b.2) de condițiile fizice

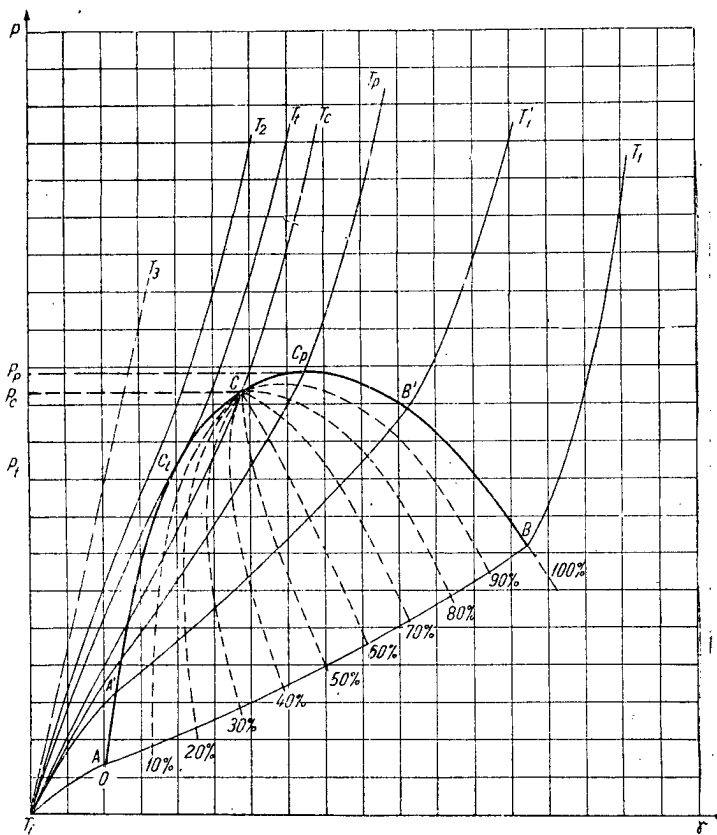
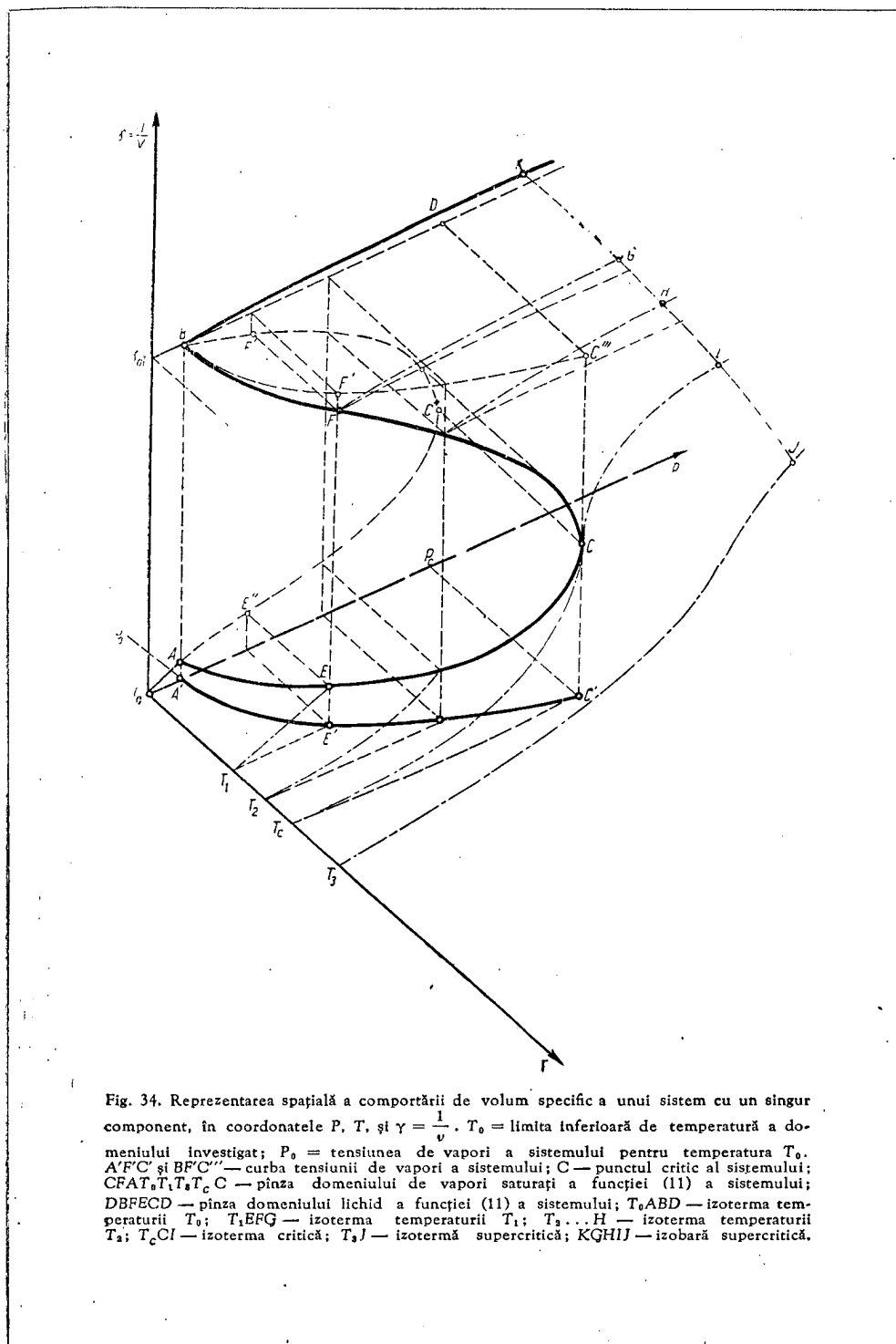


Fig. 33. Representarea comportării de volum a unui sistem binar cu solubilitate totală, de compoziție dată prin curbele de variație a greutății specifice, în funcție de presiune, la temperaturi constante:

T_1, ABT_1 — izoterme sub punctul critic (cu vaporizare-condensare); $T_2, C_p T_p$ — izoterma cricondenbarului; T_3, CT_c — izoterma punctului critic; $T_4, C_t T_t$ — izoterma cricondentermului; T_5, T_2 — izoterma supercritică; T_6, T_3 — izoterma supercritică a unui amestec de gaze perfecte. Curbele punctate și procentajele respective se referă la procentajul de fază lichidă în echilibru cu fază gazoasă.

de stare (P și T) și de legile proprii ale sistemului, care limitează concentrațiile componenților în fazele în echilibru. Acestea pot fi determinate, în cazuri simple, prin analiză termodinamică, dar în majoritatea cazurilor reale rămân de determinat experimental. Chiar și în acest caz ele sînt analizate prin experiența asupra unor transformări



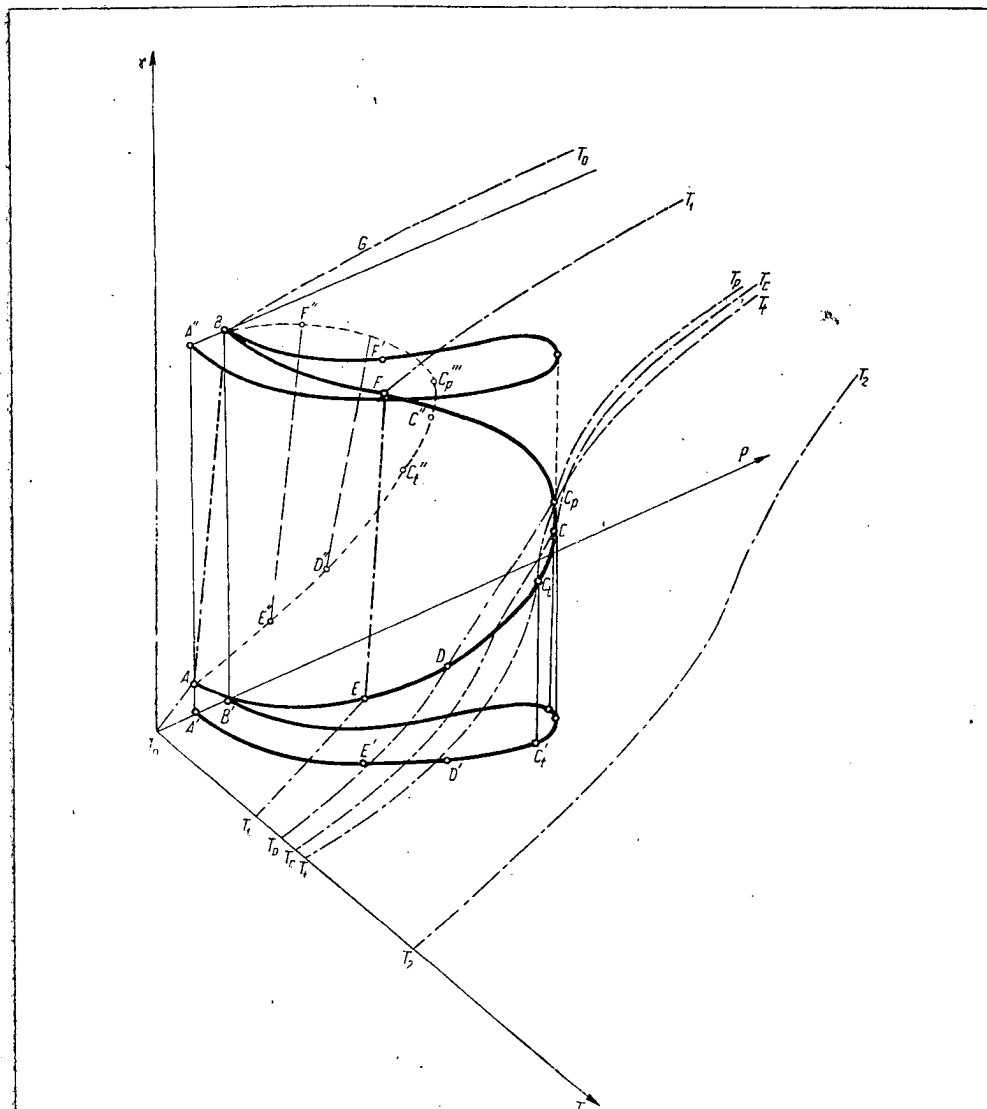


Fig. 35. Reprezentarea spațială a comportării de volum specific a unui sistem binar cu solubilitate totală, de compoziție dată, în coordonatele P , T și $\gamma = \frac{1}{v}$; T_0 — limita inferioară de temperatură a domeniului investigat; P_0 — tensiunea de vapori a sistemului pentru temperatura T_0 ; $A'F'D'C'_tC'_tB'A''C'''B$ — curbe de echilibru ale sistemului de compoziție dată, proiecții în planul PT (curba tensiunilor de vapori corespunzătoare fig. 18, 19 și 20; $AEDC_tCC_pFB$ — reprezentarea aceleiași curbe în spațiu, în funcție de volumul specific al fazei gazoase, (AC) , respectiv lichide (CB) ; $CC_tDEAT_0 \dots T_tC_tC$ — pinza corespunzătoare domeniului de vapori saturați al suprafeței, determinate prin funcția (11) a sistemului; $GBFC_pCG$ — pinza corespunzătoare domeniului de lichid al suprafeței determinate prin funcția (11) a sistemului; T_0ABQT_0 — izoterma temperaturii T_0 ; T_1EFT_1 — izoterma temperaturii T_1 ; $T_pDC_pT_p$ — izoterma oricondenbarului; T_cCT_c — izoterma critică; $T_tC_tT_t$ — izotermă supercritică.

Observație. Trecerea curbei T_t prin punctul C_p este numai aparentă, fiind datorită unui efect de perspectivă.

particulare (P , T , sau, mai rar, v , constant).

Sisteme binare și cu mai mulți componenți. Transformări izobare. Răcire. — Încălzire. În cazul unui sistem binar cu miscibilitate nulă în faza lichidă, răcind amestecul gazos, la atingerea curbei de început de condensare (curba dintre I și IIA sau dintre I și II B, fig. 12) condensază componentul respectiv pur, faza gazoasă se îmbogățește în celălalt component, pe măsura răcirii, până cînd, ajungînd la punctul eutectic E , se lichefiază ultima porțiune de lichid, cu compoziție corespunzătoare acestui punct, totdeauna aceeași, indiferent de compoziția inițială a sistemului. Spre deosebire de fenomenul clasic al solidificării eutectice, studiat frecvent în practică în petrografie și în metalurgie, fazele rezultate nefiind mecanic rigide, se produc fenomene de separare gravitațională și de coalescență, care provoacă formarea a două pături suprapuse în ordinea densităților, de componenți lichizi A și B în stare pură.

În cazul unui sistem cu miscibilitate limitată în stare lichidă, răcind un amestec gazos cu compoziția C_1 , C_2 , C'_2 , C_3 , C_4 , C'_4 sau C_5 (fig. 36) de la temperatura T_1 la temperatura T_2 , se pot produce următoarele transformări:

— În cazul unei compoziții inițiale cuprinse în domeniul C_1 , la atingerea temperaturii T_1 (respectiv a curbei de echilibru T_{AE} între faza gazoasă și cea lichidă bogată în component A) în b_1 , începe condensarea unei faze lichide cu compoziție corespunzătoare punctului a_1 , situat pe ramura de pe curba $T_{AA'}$ la aceeași temperatură ca și punctul b_1 . Condensarea decurge exact ca în cazul miscibilității totale în stare lichidă (v), terminîndu-se la T_1 , în a_2 , cu o fază lichidă cu aceeași compoziție ca cea inițială (v , și analiza din fig. 13).

— În cazul unei compoziții inițiale în domeniul C'_2 , lichefierea începe la fel, dar se termină cu lichefierea unei faze gazoase, reprezentată prin compoziția punctului E , care în momentul lichefierii se transformă în două cantități, conform raportului $\frac{EB'}{EA'}$, de faze

lichide cu compoziția A' , respectiv B' . Raportul final cantitativ de faze lichide este, însă, modificat de prezența fazei lichide condensate în prealabil.

— În cazul unei compoziții inițiale particulare C_3 , sistemul lichefiază la temperatură constantă ca un sistem cu un singur component, cu deosebirea că dă naștere la două faze lichide cu compoziția A' și B' , în raportul cantitativ $\frac{EB'}{EA'}$.

— În cazul unei compoziții inițiale C_4 , sistemul se comportă analog cu cazul C'_2 , cu

deosebirea că lichefiază prin atingerea ramurilor T_{BE} și $T_{B'B'}$.

— În cazul unei compoziții inițiale C_5 , sistemul se comportă analog cu cazul C_1 , cu deosebirea menționată în cazul compoziției inițiale C_4 .

În starea lichidă, prin răcire sub temperatura TE a unei faze de compoziție cuprinsă

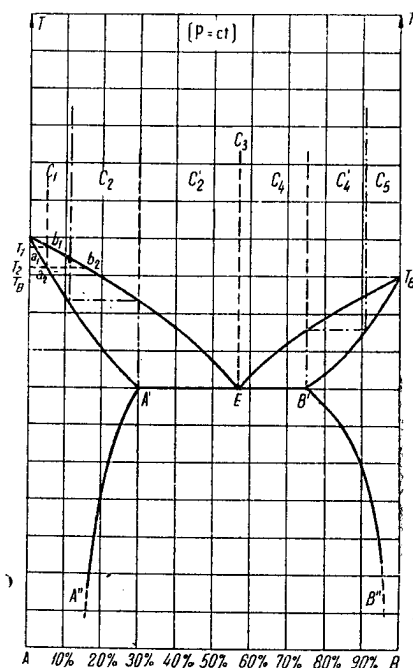


Fig. 36. Reprezentarea condensării prin răcire izobară a unui amestec binar gazos, cu solubilitate limitată în stare lichidă: C_1 , C_2 , C'_2 , C_3 , C_4 , C'_4 și C_5 — domenii de temperatură și de compoziție, cu comportare particulară la condensare; C_3 — compoziție particulară de condensare la temperatura constantă; T_A = temperatura de fierbere a componentului A ; T_B = temperatura de fierbere a componentului B ; T_{AE} = curba de echilibru reprezentînd compoziția fazei gazoase și $T_{AA'}$ — curba de echilibru reprezentînd compoziția fazei lichide, în echilibru pentru cazul cînd sistemul, relativ bogat în component A , separă la sfîrșitul condensării două faze lichide: lichid A , pur, și soluție $A + B$; T_{BE} = curba de echilibru reprezentînd compoziția fazei gazoase și $T_{BB'}$ — curba de echilibru reprezentînd compoziția fazei lichide, în echilibru, pentru cazul cînd sistemul, relativ bogat în component B , separă la sfîrșitul condensării două faze lichide: lichid pur B și soluție $A + B$; $A'A'$ — curbă de echilibru reprezentînd, în funcție de temperatură, compoziția soluției $A + B$ saturată cu A ; $B'B'$ — curbă de echilibru reprezentînd, în funcție de temperatură, compoziția soluției $A + B$ saturată cu B .

între A și A' (respectiv B/B'), sistemul atinge ramura $A'A'$ de concentrație maximă a componentului B în faza bogată în A (respectiv ramura $B'B'$ de concentrație maximă a componentului A , în faza bogată în B), separînd o fază lichidă bogată în B (respectiv A'), cu

compoziție corespunzătoare punctului de aceeași temperatură de pe ramura $B'B''$ (respectiv $A'A''$).

În cazul unui sistem cu miscibilitate totală în faza lichidă, răcirea izobară produce (în cazul transformării de tip normal), o condensare. În conformitate cu analiza din fig. 13, răcind un astfel de sistem, inițial în stare gazoasă, la atingerea temperaturii de început de condensare apare în cantitate mică [conform ecuației (31)] o fază lichidă cu o compoziție simțitor mai bogată în component puțin volatil. Pe măsura răcirii, cantitatea de lichid crește, iar compoziția lui se apropie treptat de aceea a fazei gazoase inițiale, pe care o atinge în momentul sfârșirii transformării în stare lichidă.

Sistemele binare cu solubilitate totală pot prezenta cazuri de comportare anormală în privința solubilității și anume pot prezenta puncte de fierbere propriu zisă la temperatură constantă pentru anumite compoziții intermediare între acelea ale componentilor (amestecuri azeotrope). În aceste cazuri, diagrama compor-

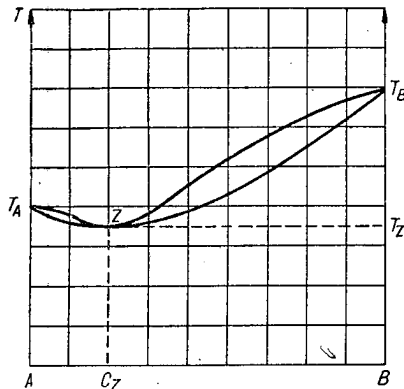


Fig. 37. Reprezentarea fierberii — condensării izobare a unui sistem binar cu solubilitate totală în faza lichidă, prezentând un azeotropism cu minim de temperatură: T_A — temperatura de fierbere a componentului A; T_B — temperatura de fierbere a componentului B; T_Z — temperatura de fierbere a amestecului azeotrop; C_Z — compoziția amestecului azeotrop.

tării de compoziție la răcire izobară are aspectul din fig. 37 (azeotrop cu minimum de temperatură) sau din fig. 38 (azeotrop cu maximum de temperatură). Consecința practică a acestei anomalii este împiedecarea de a realiza o separație totală a celor doi componenți prin distilare fracțională.

În aceste cazuri, oricât de strînsă ar fi fracționarea, ea nu permite decât obținerea unuia dintre componenți în starea de puritate obișnuită prin această metodă, în locul celui de al doilea, obținîndu-se amestecul azeotrop respectiv. În amestecurile de hidrocarburi cele azeotrope au importanță practică mai mult la prelucrare, prin posibilitatea de a se extrage unele amestecuri azeotrope cu indice octanic mare etc.

Analiza comportării de compoziție a sistemelor binare, cum și a celor reale cu mai mulți componenți, constituind fluidele din zăcămintele de hidrocarburi, poate fi făcută prin una din următoarele metode:

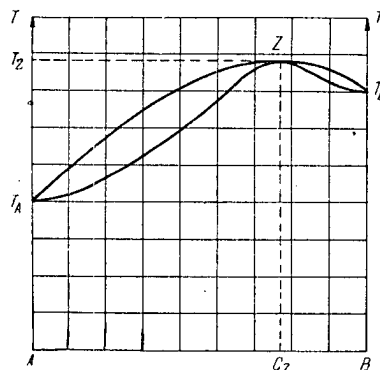


Fig. 38. Reprezentarea fierberii — condensării izobare a unui sistem binar cu solubilitate totală în faza lichidă, prezentând un azeotropism cu maxim de temperatură: T_A — temperatura de fierbere a componentului A; T_B — temperatura de fierbere a componentului B; T_Z — temperatura de fierbere a amestecului azeotrop; C_Z — compoziția amestecului azeotrop.

1. Metoda solubilității gazelor în lichide, proporțională cu presiunea parțială a componentului respectiv.
2. Metoda fugacităților.
3. Metoda coeficienților de repartiție determinați experimental.

1. Analiza comportării, bazată pe proporționalitatea solubilității cu presiunea. În ipoteza solubilității unui component gazos în faza lichidă, proporțional cu presiunea parțială a celui component

$$p_i = P_i'' x_i \quad (32)$$

unde:

p_i este presiunea parțială a componentului i (presiunea pe care ar avea-o aceeași cantitate de component din faza gazoasă dacă ar ocupa singur volumul întregii faze gazoase);

P_i'' — presiunea de vapori a componentului i la temperatura respectivă;

x_i — concentrația (molară) componentului i , în faza lichidă.

Prin definiția presiunii parțiale (în ipoteza comportării ca gaz perfect a fazei gazoase),

$$p_i = P y_i \quad (33)$$

unde:

P este presiunea efectivă a fazei gazoase;

y_i — concentrația componentului i în faza gazoasă, molar (sau, cf. legii Avogadro, volumetric).

Notînd cu k_i raporturile:

$$k_i = \frac{P_i''}{P} = \frac{y_i}{x_i} \quad (34)$$

cu n_i — concentrația (molară) globală a componentului i în tot sistemul; cu n_L — fracțiunea molară a fazei lichide (raportul dintre numărul de molecule ale fazei lichide și numărul total de molecule ale sistemului) și cu n_G — fracțiunea molară a fazei gazoase (definită analog), n_i poate fi exprimat astfel:

$$n_i = n_L x_i + n_G y_i = n_L \frac{p_i}{P} + n_G \frac{p_i}{P} \quad (35)$$

$n_i = \frac{p_i}{P} (n_L + n_G k_i)$ și deoarece, prin definiție, $n_G + n_L = 1$,

$$x_i = \frac{x_i}{1 + n_G (k_i - 1)} \quad (36)$$

și

$$y_i = \frac{n_i k_i}{1 + n_G (k_i - 1)} \quad (37)$$

În ipotezele menționate, pentru valabilitatea ecuațiilor (32) și (33), coeficienții k_i pot fi determinați cu ecuația (34) pentru orice presiune P și pentru orice temperatură T (care determină pe P_i'')

În aceste condiții, k_i , fiind funcție numai de P și de T , a fost numit « constanta de echilibru » a componentului i , fiind aparent independent de concentrațiile x_i și y_i .

Sub această rezervă, compoziția fazei gazoase (seria de concentrații y_i) și a fazei lichide (x_i) pot fi determinate folosind condițiile $\sum x_i = \sum y_i = 1$, adică

$$\begin{aligned} \sum \frac{n_i}{1 + n_G (k_i - 1)} &= \\ &= \sum \frac{n_i k_i}{1 + n_G (k_i - 1)} = 1 \end{aligned} \quad (38)$$

În ecuațiile (echivalente) (38), singura necunoscută este n_G și prin determinarea ei, problema comportării de compoziție a sistemului este rezolvată: cantitatea fazelor în echilibru prin n_G și $n_L = 1 - n_G$ și calitatea fazelor prin seriile de coeficienți x_i și y_i determinați conform relației (36), respectiv (37).

Metoda permite, în principiu, determinarea pentru orice sistem asemănător, a locului geometric în coordonate P , T și x_i al punctelor de început de fierbere sau de sfârșit de lichefiere, prin rezolvarea ecuației de condiție $n_L = 1$, ceea ce transformă ecuația (37) în

$$\sum u_i k_i = 1 \quad (39)$$

sau a locului geometric al punctelor de sfârșit de fierbere — început de lichefiere, prin rezolvarea ecuației de condiție $n_G = 1$, ceea ce transformă ecuația (37) în

$$\sum \frac{n_i}{k_i} = 1 \quad (40)$$

Rezolvarea ecuațiilor (39) și (40) se face prin încercări și prin interpolare, ținând seama de faptul că valoarea sumelor respective variază continuu, și, pe intervale nu prea mari, în același sens, când variază temperatura și presiunea, adică:

$$\frac{\partial \sum n_i k_i}{\partial P} \cdot \frac{\partial \sum n_i k_i}{\partial T} > 0$$

sau

$$\frac{\partial \sum n_i / k_i}{\partial P} \cdot \frac{\partial \sum n_i / k_i}{\partial T} > 0 \quad (41)$$

Această metodă reprezintă practic numai o treaptă de aproximare, deseori nesatisfăcătoare, datorită invalidității ipotezelor de solubilitate și de comportare ca gaze perfecte.

Pentru rezolvarea numerică, a se vedea Cap. IV B.d., tensiuni de vapori.

Faptul că, în domeniile de presiuni și de temperaturi din zăcămine, fluidele respective nu satisfac nici legea de solubilitate

(în formă exactă, $s_i p_i = \frac{x_i}{1 - x_i}$, sau în formă aproximativă, satisfăcătoare, când x_i este foarte mic față de unitate, $s_i p_i \approx x_i$, ceea ce revine la

a scrie ecuația (34) sub forma: $k_i = \frac{1}{s_i P}$), nici legea de stare a gazelor perfecte, a determinat elaborarea metodei următoare.

2. Analiza comportării de fază, bazată pe coeficienții de fugacitate. Metoda fugacităților se bazează pe ipotezele:

a) sistemul se comportă ca o soluție ideală, care satisface legea aditivității volumelor și a entalpiilor;

b) se pot înlocui în ecuația (34): presiunea, P_i'' , prin fugacitatea componentului i în faza gazoasă; f_{gi} , și P , prin fugacitatea componentului i în faza lichidă f_{li} .

Fugacitatea, mărime de dimensiunile unei presiuni, este definită analitic conform legii de stare (11) a componentului respectiv, ca f din ecuația:

$$\ln \frac{f}{f_0} = \frac{1}{RT} \int_{P_0}^P V dP \quad (42)$$

în care:

f este fugacitatea, în unități de presiune;
 f_0 — fugacitatea, respectiv tensiunea de vapori a componentului considerat, luată la temperatura T_0 , suficient de joasă, și la presiunea P_0 , suficient de joasă, pentruca, în limita erorilor de măsură, $f_0 = P_0$;

V — volumul specific molar al componentului respectiv, în funcție de temperatură și de presiune, determinabil cu ecuația (11).

Definiția termodinamică a fugacității este

$$f = f_0 \exp \left(\frac{\mu - \mu_T}{RT} \right) \quad (43)$$

unde:

«exp» este simbolul funcției exponențiale:
 $\exp x = e^x$;

μ — potențialul fizico-chimic al componentului respectiv;

μ_T — o funcție de aceeași natură ca potențialul fizico-chimic, specifică componentului respectiv și depinzând numai de temperatură *).

Potențialul fizico-chimic al componentului i în sistem este derivata parțială a potențialului izobar, \mathcal{Z} , al sistemului în funcție de numărul de molecule de component i , fiind constante P , T și numerele de molecule ale celorlalți componenți:

$$\mu_i = \left(\frac{\partial \mathcal{Z}}{\partial n_i} \right)_{T, P, \text{și } |n} \quad (46)$$

unde:

n simbolizează: $n_1, n_2, \dots, n_{i-1}, n_{i+1}, \dots$

\mathcal{Z} este potențialul izobar al sistemului definit prin

$$H - TS = \mathcal{Z} \quad (47)$$

unde:

H este entalpia sistemului;

S — entropia sistemului;

T — temperatura absolută.

Observație. Potențialul izobar este o mărime de dimensiunile unei energii specifice; în ecuația (47) este exprimat, în particular, în unități de cantitate de căldură cal/kg, dar la aplicarea în ecuația (46) este necesară fie convertit în unități de lucru mecanic (m·kg) pentru a obține μ , în m·kg/kg, și a realiza astfel un argument adimensional al exponențialei din ecuația (43).

Conform definiției, pentru gazele perfecte, $f = P$, iar pentru gazele reale,

$$f = \gamma P \quad (44)$$

γ fiind coeficientul de activitate al componentului respectiv.

În consecință,

$$RT \ln \frac{f}{f_0} = \int_0^P \left(V - \frac{RT}{P} \right) dP \quad (45)$$

În practică, determinarea fugacităților, respectiv a coeficienților de activitate, este o operație delicată, legată de erori inerente operațiilor de extrapolare.

Pentru calcularea fugacităților se recurge:

— în cazul hidrocarburilor cu greutate moleculară mică, la datele experimentale din tabelele 53, 54, 75, 90, 91, 113 și 114 (v.B.d.1);

— în cazul sistemelor de hidrocarburi mai grele cu număr foarte mare de izomeri, la determinarea aproximativă pe baza temperaturilor și a presiunilor reduse, folosind fig. 39, 40, 41 sau 42;

— și în cazuri speciale, la calculul cu ecuațiile (47), (46) și (43) sau, mai expeditiv, cu ecuația (42) și cu legea de stare aproximativă a sistemelor de hidrocarburi din diagrama fig. 43.

Metoda fugacităților este aplicată din ce în ce mai rar pentru determinarea compoziției fazelor sistemelor de hidrocarburi, în condițiile de zăcămint, din cauza abaterilor foarte mari pe care le introduce în condiții particulare de temperatură și de presiune (în apropierea punctului critic), în care sistemele respective se abat simțitor de la comportarea soluțiilor ideale. O altă cauză de inexactitate a metodei o constituie ipoteza simplificatoare că «constanta de echilibru» k_i a componentului i ar fi independentă de compoziția restului sistemului. Dacă în unele game particulare de temperaturi, de presiuni și de compoziții, aproximația este admisibilă, în altele, îndeosebi în cazul sistemelor din zăcămintele «de condensat», ea poate da rezultate cu totul neconforme.

3. Analiza comportării de fază, bazată pe coeficienți de repartitie (echilibru) experimentali. Metoda coeficienților de echilibru reali constă în determinarea coeficienților k_i , definit ca y_i/x_i , nu prin raporturi de presiuni sau de fugacități, ci, conform definiției, ca raport de concentrații ale componentului i în faza gazoasă, respectiv lichidă *). Prin aceasta se evită erorile introduse prin considerarea de fluide sau de soluții termodinamic ideale și prin neglijarea dependenței lui k_i de natura restului sistemului. Pentru a beneficia de acest avantaj este însă necesar să se dispună de determinări de concentrații x_i și y_i efectuate chiar asupra unui sistem cu compoziție identică cu aceea a sistemului considerat.

Practic, cu cât greutatea moleculară a componentului i este mai apropiată de greutatea moleculară medie a sistemului, cu atât k_i

*) Pentru gazele perfecte $\mu = \mu_T + RT \ln P$

*) Pentru acest motiv, în acest caz, s-a propus pentru k_i numele de «coeficient de repartitie», mult mai expresiv, dar nu încă uniform adoptat.

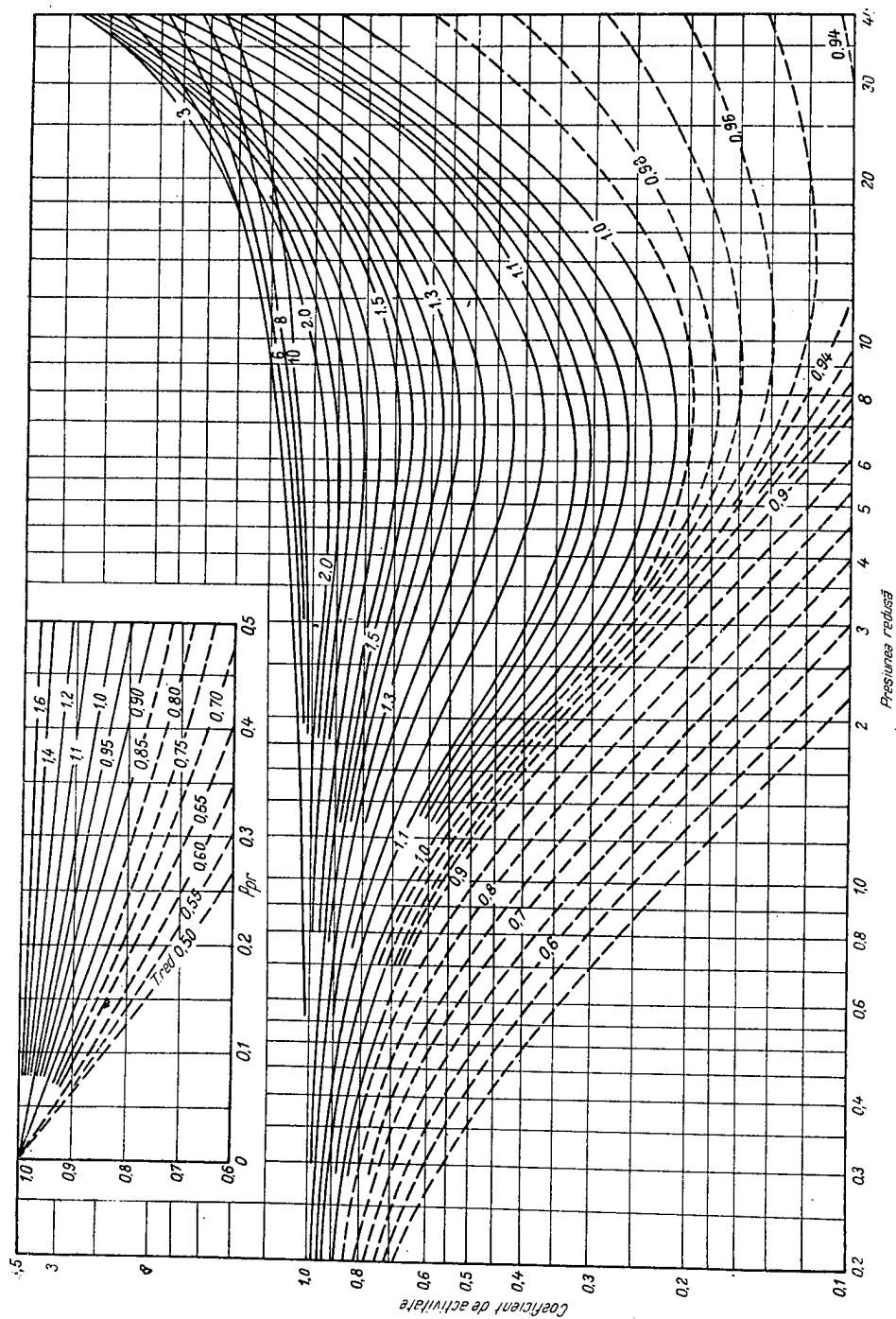


Fig. 39. Coeficienții de activare a hidrocarburilor în fază gazoasă, în funcție de temperatura redusă și de presiunea redusă. Diagrama generală pentru presiuni joase: $0,2 < x < 10$ și temperaturi joase $0,5 < \theta < 3$. Diagrama de detaliu pentru presiuni joase: $0,5 < \theta < 1,6$.

poate fi considerat mai constant față de variația compoziției sistemului. Ca principiu general de calcul, cu cât componentul i se găsește în concentrație generală (n_i) mai redusă, cu atât se pot folosi procedee de calcul mai aproximative (metodele 1), 2) sau 3), cu coeficienții k_i cunoscuți mai puțin exact).

Din înfinitatea de date experimentale teoretic necesare pentru rezolvarea generală a

= 5) *), la temperatura de 37,8°C și la presiunile de 33,15, 70,30 105,45 și 140,60 kg/cm², s-au obținut datele din tabela 5.

Din prelucrarea prin interpolare a datelor din tabela 4 (completate într-o gamă mai largă de compoziție), se pot deduce coeficienții de echilibru (coeficienții de repartitie) la această temperatură, la diferite presiuni și la diferite compoziții. Pentru a înlesni exami-

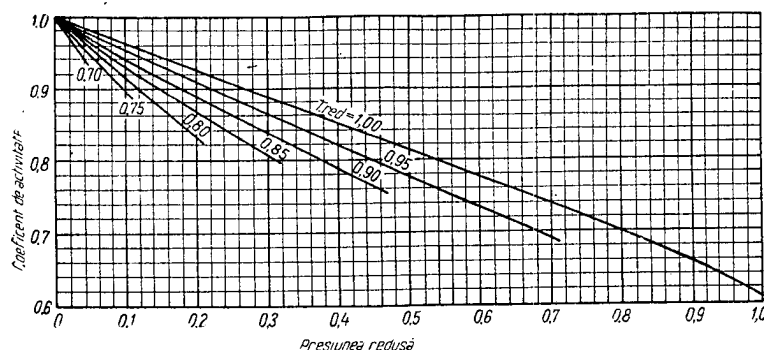


Fig. 40. Coeficienții de activitate ai hidrocarburilor în fază gazoasă, în funcție de temperatura redusă și de presiunea redusă. Diagrama pentru domeniul presiunilor și al temperaturilor reduse: $7 < \theta < 1,00$ și $0 < \pi < 1,0$.

problemei, se dispune: a) de tabele (v. tabelele și figurile respective din Cap. IV B.d.), de coeficienți k_i pentru fiecare alcan normal și pentru unii izomeri între C_1 și C_7 , pentru metan și pentru etan chiar în funcție de compoziția restului sistemului (greutate moleculară); și b) de tabele de coeficienți ai aceluiași alcani în țiteiuri obișnuite (cu greutatea specifică de ordinul 0,820–0,850 și cu greutatea moleculară medie de circa 240) (v. tabelele 130–140).

Dată fiind originea experimentală deosebită, cifrele din tabelele indicate nu prezintă o corespondență riguroasă. Se recomandă, în general, folosirea datelor din tabelele 4 și 5 pentru sistemele având peste 20–30% (molecular) hidrocarburi cu patru sau cu mai puțini atomi de carbon în moleculă, ceea ce, în linii mari, corespunde zăcămintelor de gaze bogate și de gaze cu condensat; folosirea datelor din tabelele 130–140 este recomandată în sistemele corespunzătoare țiteiurilor cu puține gaze așa-numite, permanente, sau cu puține gaze lichefiabile și îndeosebi în gama presiunilor și a temperaturilor reduse subunitare.

În cazuri speciale, este necesară determinarea detaliată, experimentală, a coeficienților de repartitie. De exemplu, în cazul sistemului ternar, metan + etan + n-pentan (pentru comportare de fază, v. fig. 26–31), prin determinarea concentrațiilor metanului ($i = 1$), ale etanului ($i = 2$) și ale n-pentanului ($i =$

Tabela 4. Concentrațiile de echilibru ale sistemului C_1 (metan), C_2 (etan) și C_5 (pentan), în regiunea cu două faze, la temperatura de 37,8°C și la presiuni diferite. Date experimentale. Frații molare

Presiunea kg/cm ²	Concentrațiile fazei gazoase			Concentrațiile fazei lichide		
	y_1	y_2	y_5	x_1	x_2	x_5
35,15	0,904	0,0377	0,0583	0,154	0,0284	0,818
	0,652	0,297	0,0519	0,115	0,223	0,662
	0,517	0,431	0,0511	0,0947	0,327	0,578
	0,275	0,681	0,0440	0,0550	0,514	0,431
	0,000	0,965	0,0349	0,0000	0,736	0,264
70,30	0,762	0,188	0,0499	0,263	0,211	0,526
	0,674	0,282	0,0452	0,246	0,314	0,440
	0,596	0,360	0,0443	0,237	0,396	0,368
	0,548	0,405	0,0468	0,224	0,444	0,331
	0,483	0,473	0,0438	0,214	0,515	0,271
105,45	0,394	0,562	0,0441	0,198	0,602	0,200
	0,196 *)	0,758 *)	0,0450 *)	0,196 *)	0,758 *)	0,0451 *)
	0,814	0,125	0,0608	0,420	0,152	0,428
	0,689	0,244	0,0670	0,412	0,291	0,291
	0,588	0,334	0,0779	0,413	0,378	0,209
140,60	0,461 *)	0,443 *)	0,0953 *)	0,462 *)	0,443 *)	0,0948 *)
	0,899	0,0173	0,0833	0,580	0,0217	0,399
	0,801	0,0981	0,101	0,587	0,116	0,297
	0,763	0,121	0,116	0,599	0,140	0,261

*) În aceste condiții, sistemul se găsește în stare monofazică.

*) Notația 5 în loc de 3 a fost luată pentru a sugera numărul atomilor de C din molecula pentanului normal.

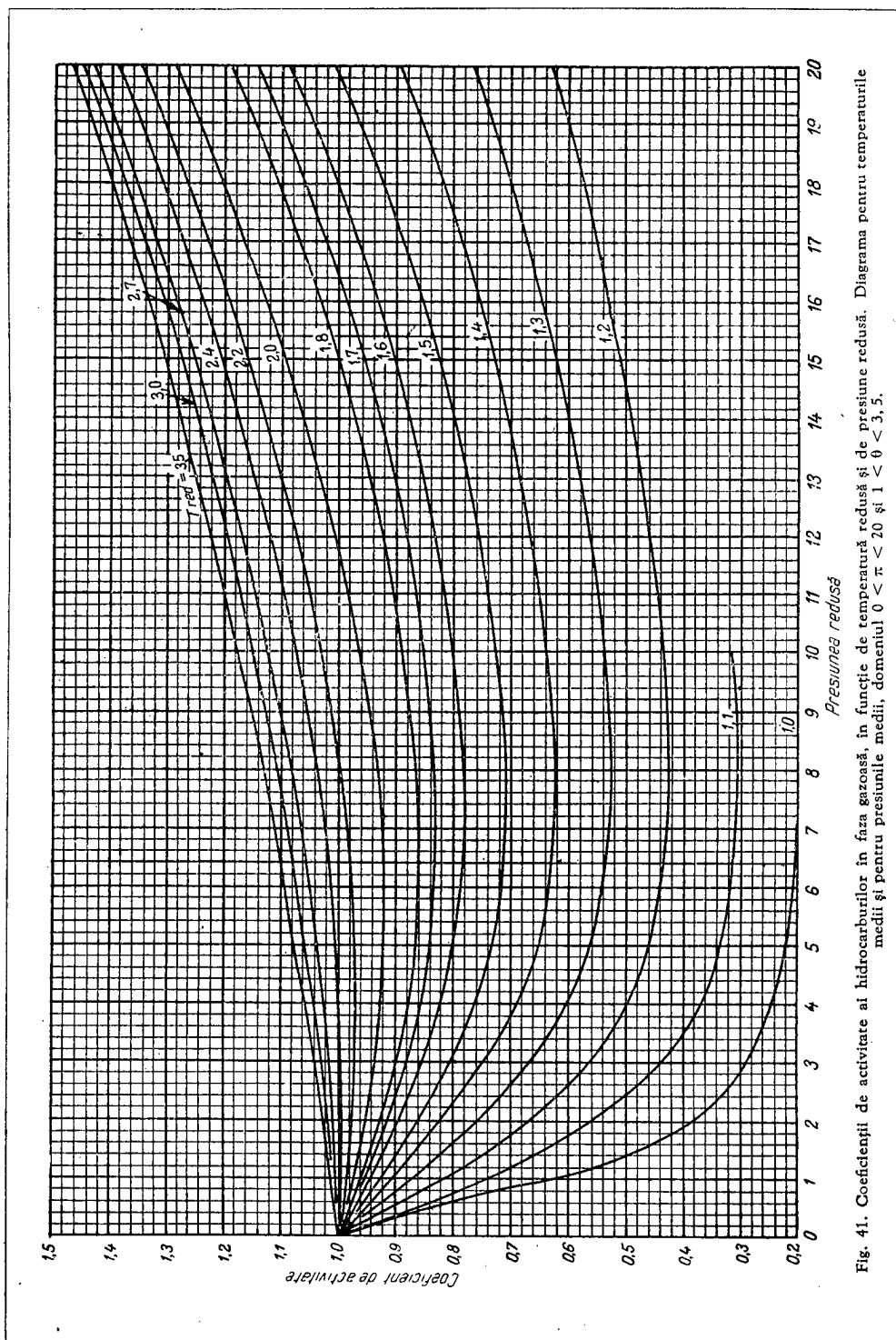
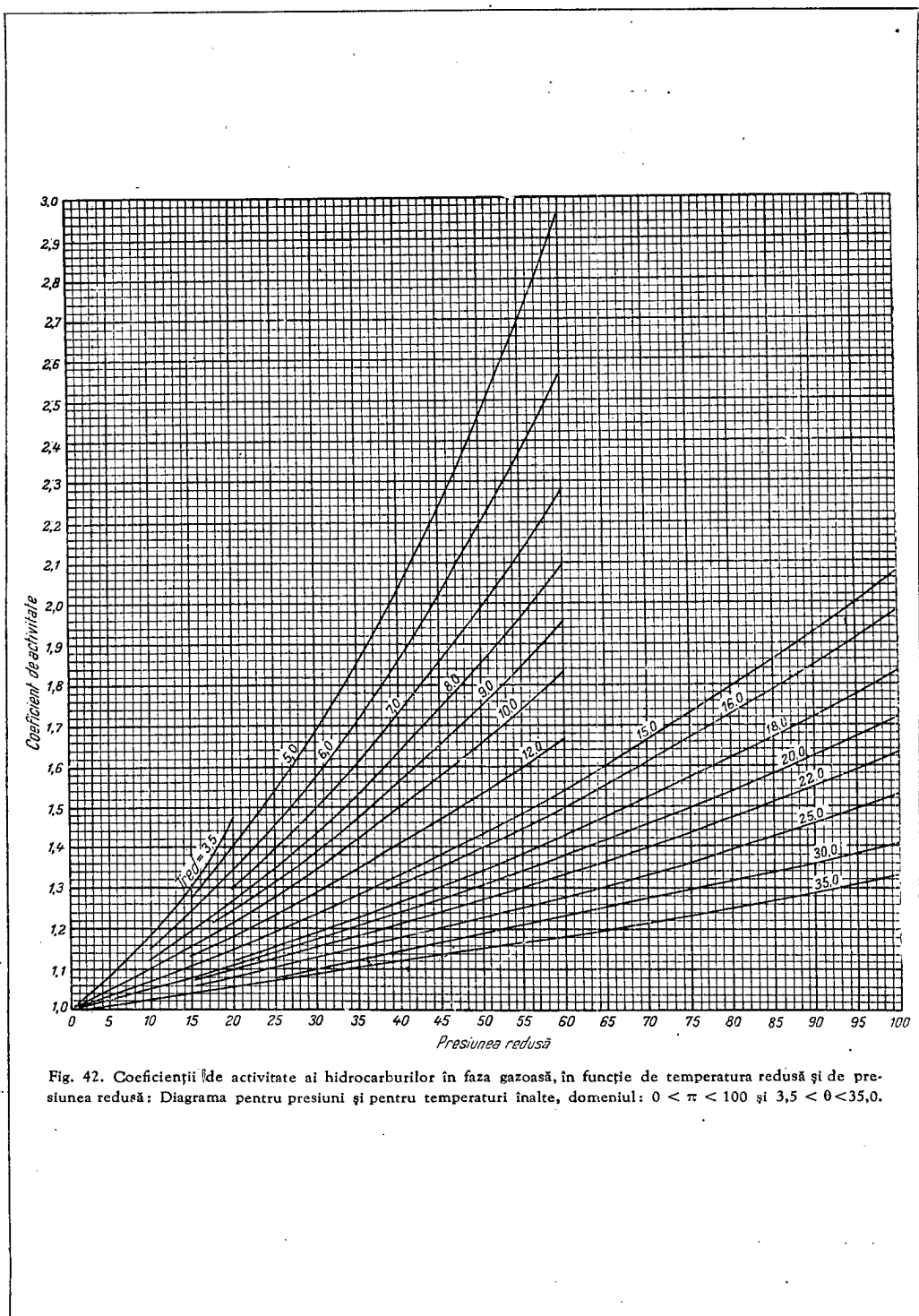


Fig. 41. Coeficienți de activare ai hidrocarburilor în faza gazoasă, în funcție de temperatură redusă și de presiune redusă. Diagrama pentru temperaturile medii și pentru presiunile medii, domeniul $0 < \pi < 20$ și $1 < \theta < 3,5$.



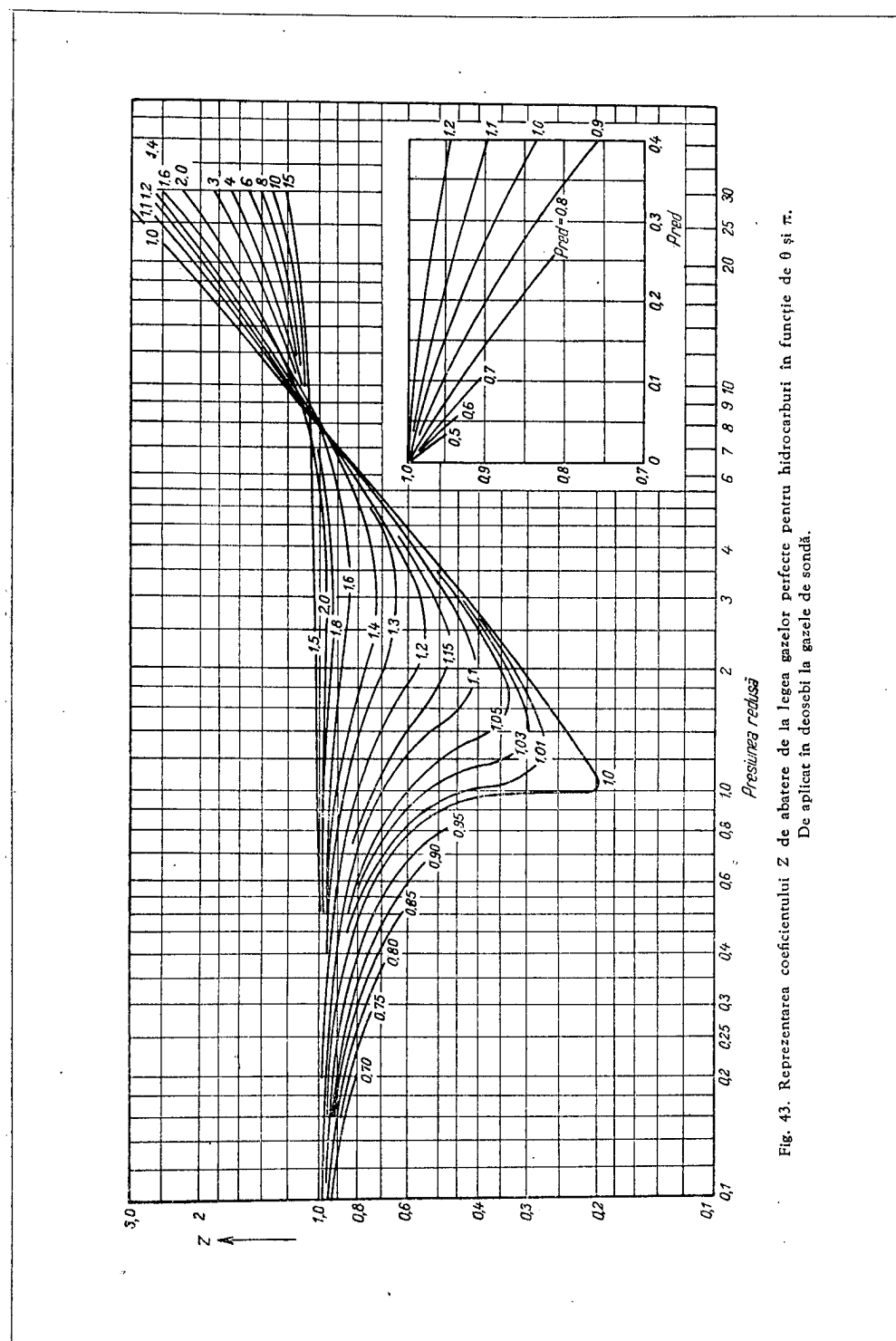


Fig. 43. Reprezentarea coeficientului Z de abatere de la legea gazelor perfecte pentru hidrocarburi în funcție de θ și π .
De aplicat în deosebi la gazele de sondă.

narea problemei variației coeficientului de echilibru al metanului cu variația compoziției sistemului, s-a ales ca parametru auxiliar reprezentativ al acestuia, parametrul c , definit astfel:

$$c = \frac{x_2}{x_2 + x_3}$$

Rezultatele acestei prelucrări sînt date în tabelul 5.

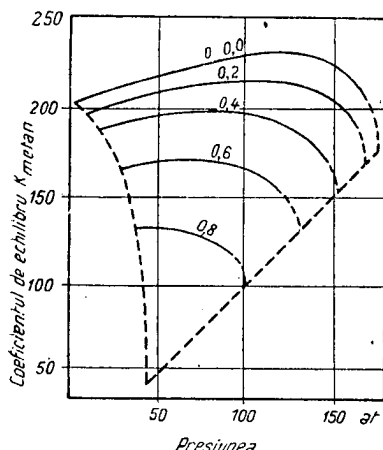


Fig. 44. Reprezentarea coeficienților de echilibru k , pentru metan, în sistemul metan + etan + n-pentan, la temperatura de $37,8^\circ\text{C}$, în funcție de presiune și de compoziția restului sistemului, exprimată prin parametrul auxiliar $c = x_2 / (x_2 + x_3)$.

Extremitățile punctate ale curbelor reprezintă zone în care valorile lui k sînt date numai indicativ, cu probabilitate, din cauza dificultăților experimentale de determinare exactă. Pentru a mări precizia reprezentării, s-a luat în ordonată produsul $P \cdot k_1$ în loc de k_1 .

Reprezentarea grafică a coeficienților de echilibru (fig. 44, 45 și 46) indică și ea că acest coeficient este funcție de compoziția sistemului prin multiplicitatea curbelor, pentru aceeași temperatură de $37,80^\circ\text{C}$.

În cazul sistemelor cu un singur component, valorile $k_1 = 1$ reprezintă punctele de fierbere, iar în cazul sistemelor multicomponente, și punctul sau punctele critice.

Se observă variația cu 20–60% a coeficientului k_1 , respectiv 30–300% a coeficientului k_5 , și constanța remarcabilă a coeficientului k_2 în raport cu variația compoziției globale a sistemului, ceea ce confirmă sensibilitatea enunțată mai înainte a coeficientului k_i (pentru compoziții cu proprietăți fizice mult diferite de cele ale componentelor medii ai sistemului) față de variația compoziției sistemului. Ilustrarea acestei proprietăți este dată și de fig. 47, care reprezintă valorile k_i pentru primii șapte alcani în două țiteiuri de naturi diferite, la $t^0 = 123^\circ\text{C}$, în funcție de presiune, cum și de fig. 48 (constanța remarcabilă a componentelor medii prin comparație cu cei extremi).

Aceasta face ca determinarea prin calcul, pe baza datelor existente pentru k_1 , să fie destul de riscantă în cazul sistemelor cu mai

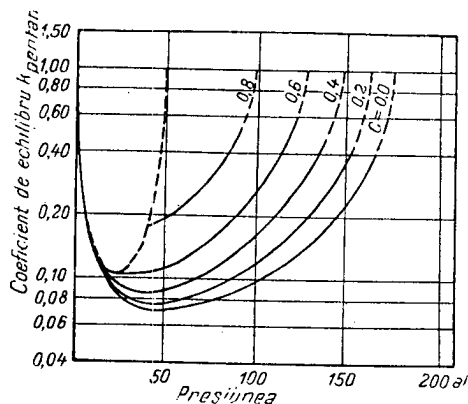


Fig. 45. Reprezentarea coeficienților de echilibru k_5 pentru etan, în sistemul metan + etan + n-pentan, la temperatura de $37,8^\circ\text{C}$, în funcție de presiune și de compoziția sistemului. Extremitățile punctate ale curbelor, în zona punctelor critice, reprezintă regiuni în care valorile lui k sînt date numai indicativ, din cauza dificultăților experimentale de determinare exactă.

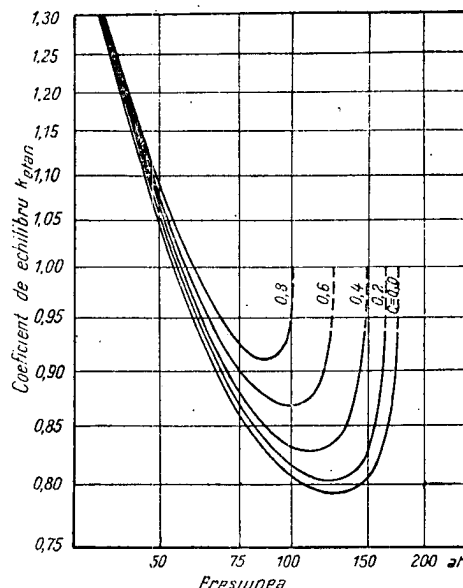


Fig. 46. Reprezentarea coeficienților de echilibru k_5 pentru n-pentan, în sistemul metan + etan + n-pentan, la temperatura de $37,8^\circ\text{C}$, în funcție de presiune și de compoziția sistemului. Extremitățile punctate ale curbelor, în zona punctelor critice, reprezintă regiuni în care valorile lui k sînt date numai indicativ, din cauza dificultăților experimentale de determinare exactă.

mult decît doi componenți, care se deosebesc mult între ei în ce privește proprietățile lor fizice. În cazul zăcămintelor de gaze cu condensat, calculele teoretice de această natură

Tabela 5. Coeficienții de echilibru ai sistemului $C_1 + C_2 + C_3$ la temperatura de $37,8^\circ\text{C}$ la diferite presiuni și la diferite compoziții, în domeniul cu două faze

Presiunea, kg/cm ²	C	Coeficienții de echilibru			Compoziția fazei gazoase			Compoziția fazei lichide		
		k_1	k_2	k_3	y_1	y_2	y_3	x_1	x_2	x_3
35,15	0,0	5,87	1,53	0,0718	0,940	0,000	0,0603	0,160	0,0000	0,840
	0,2	5,74	1,33	0,0782	0,712	0,233	0,0547	0,124	0,1752	0,701
	0,4	5,40	1,32	0,0895	0,469	0,482	0,0499	0,0868	0,365	0,548
	0,6	4,79	1,32	0,108	0,200	0,759	0,0414	0,0417	0,575	0,383
70,30	0,0	3,08	0,882	0,0765	0,9471	0,000	0,0530	0,308	0,000	0,693
	0,2	2,98	0,887	0,0858	0,8225	0,128	0,0497	0,276	0,145	0,579
	0,4	2,77	0,897	0,102	0,6834	0,270	0,0461	0,247	0,301	0,452
	0,6	2,39	0,914	0,147	0,5265	0,428	0,0459	0,220	0,468	0,312
	0,8	1,85	0,942	0,250	0,3472	0,612	0,0406	0,188	0,650	0,163
105,45	0,0	2,14	0,811	0,105	0,9412	0,0000	0,0588	0,440	0,0000	0,560
	0,2	2,00	0,816	0,130	0,8460	0,0942	0,0601	0,423	0,115	0,462
	0,4	1,79	0,829	0,181	0,7428	0,194	0,0636	0,415	0,234	0,351
	0,6	1,50	0,869	0,315	0,6204	0,306	0,0739	0,414	0,352	0,235
140,60	0,0	1,59	0,791	0,189	0,9205	0,0000	0,0796	0,579	0,000	0,421
	0,2	1,44	0,825	0,278	0,8581	0,0690	0,0830	0,582	0,0836	0,334
	0,4	1,21	0,878	0,540	0,7347	0,1379	0,1272	0,607	0,157	0,236

sînt deosebit de riscate, pentru prevederea comportării și pentru proiectarea exploatării asupra unor probe reprezentative extrase din zăcămint, pe cît posibil în condițiile inițiale de zăcămint.

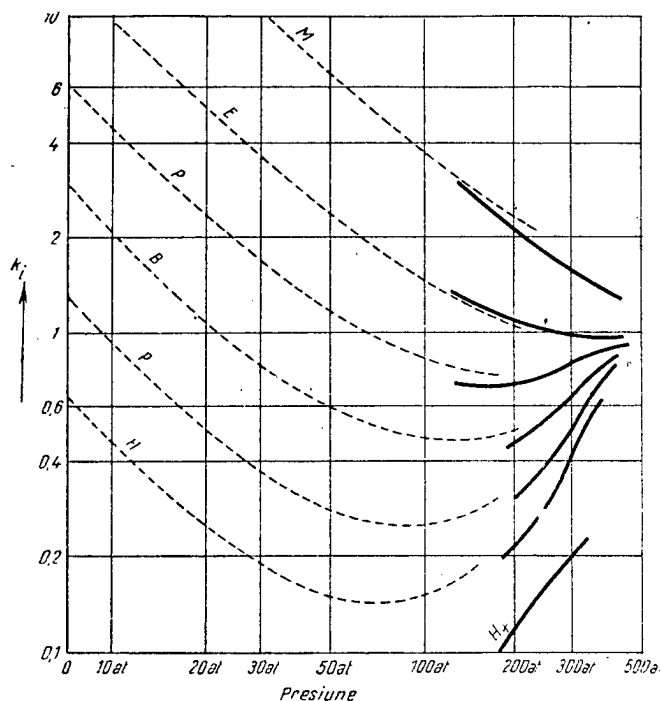


Fig. 47. Coeficienții de repartiție ai principalilor alcani ($C_1 - C_7$) în echilibru cu două țiteuri diferite, la temperatura de $123,3^\circ\text{C}$, în funcție de presiune. Curbele întrerupte se referă la echilibrul cu un țitei relativ greu ($\gamma = 0,833$). Curbele continue se referă la echilibrul cu un țitei relativ ușor ($\gamma = 0,780$). În ambele cazuri, compoziția medie a întregului sistem este determinată aproximativ prin γ și printr-o rație de gaze la separator (presiune de separație egală cu cea atmosferică) de ordinul $640\text{m}^3/\text{N}/\text{m}^3$. Reprezentarea este limitată la domeniul de presiuni pentru care se dispune de date.

lor, recomandîndu-se insistent să se efectueze determinări experimentale ale coeficienților k_i asupra unor probe reprezentative extrase din zăcămint, pe cît posibil în condițiile inițiale de zăcămint.

În ce privește extracția țiteiului și a gazelor, utilizările coeficienților de echilibru sînt variate. În sistemele cu un singur component, $k_i > 1$ reprezintă starea gazoasă, iar $k_i < 1$, starea lichidă; $k_i = 1$ reprezintă condiția analitică în coordonate (P, t^0) a coexistenței a două faze, iar locul geometric al acestuia este curba tensiunii de vapori. În sistemele cu mai mulți componenți, condiția $k_i \geq 1$ reprezintă numai tendința componentului considerat, în cazul $k_i > 1$, de a se concentra în faza gazoasă, respectiv în cazul $k_i < 1$, tendința componentului considerat de a trece în faza lichidă. Din aceste elemente se pot formula concluzii în legătură cu tendința unui sistem în ce privește comportarea de fază la variația, de exemplu, a presiunii, pe baza variației coeficientului k_i al componentului predominant sau al unui grup de componenți predominanți, dacă aceștia au caracteristici de stare de agregare apropiate.

De exemplu, în fig. 45 se observă că la temperatura de $37,8^\circ\text{C}$ etanul prezintă valoarea $k_2 \approx 1$ (în curs de scădere), în gama de presiuni de 55—60 at, ceea ce exprimă tendința

(în sistemul examinat) etanului de a trece, la creșterea presiunii, din starea gazoasă în starea lichidă. Prin creșterea mai departe a presiunii, k_2 atinge un minim în gama presiunilor de 80—170 at (după compoziția sistemului), după care, crescând din nou, exprimă tendința etanului de a trece din nou în starea lichidă (comportare retrogradă, pe care o analiză completă o poate confirma dacă concentrația globală a etanului în întregul sistem nu este atât de mică, încât comportarea etanului să nu influențeze pe aceea a sistemului).

Din examinarea asemănătoare a fig. 46 rezultă că la 37,8°C pentanul prezintă chiar la presiunea atmosferică, pentru k_5 , o valoare apropiată de unitate, scăzând repede cu presiunea, pentru a atinge în jurul presiunii de 45 at un minim $k_5 \approx 0,07$, iar de la această presiune în sus, pînă la circa 170 at (în cazul unui conținut mare de pentan), el prezintă o tendință pronunțată de a imprima sistemului o comportare retrogradă.

Infinitatea punctelor (determinate prin presiune și prin temperatură) în care un sistem cu compoziție dată prezintă $k_i = 1$ indică de asemenea că, spre deosebire de sistemele cu unul sau cu doi componenți, care, pentru o compoziție dată, prezintă un punct critic unic, un sistem cu trei sau cu mai mulți componenți cu compoziție dată prezintă o infinitate de puncte critice situate într-o anumită gamă de temperaturi și de presiuni, acestea fiind legate printr-o relație $f(P, t^0) = 0$, specifică sistemului cu compoziție dată.

Una dintre cele mai directe utilizări ale coeficienților k_i la controlul exploatarei zăcămintelor este determinarea compoziției uneia dintre fazele prezente în zăcămint pe baza cunoașterii compoziției celeilalte faze și a coeficienților k_i , de exemplu, la săparea unei sonde de explorare care străpunge zona petrolieră a unui zăcămint, cînd analiza gazelor

produse de sondă la separator nu dă indicații exacte asupra gazelor din eventuala zonă de gaze libere a zăcămintului, deoarece, afară de cazul cînd sonda ar fi atins parțial și zona de gaze libere, caz exclus prin ipoteza inițială, gazele produse la separator provin din faza

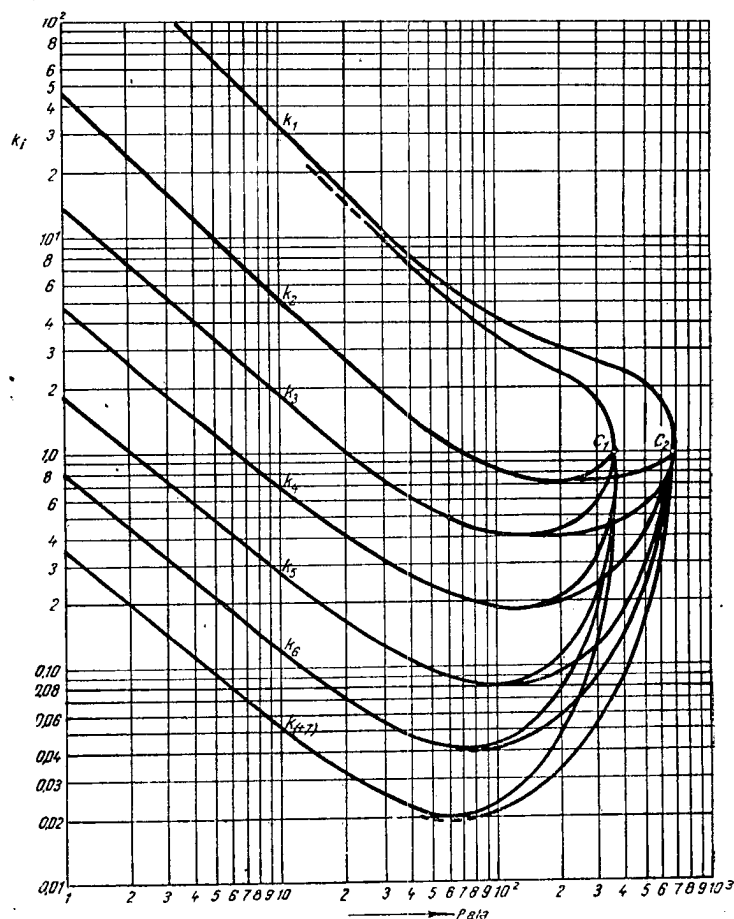


Fig. 48. Coeficienți de repartitie ai principalilor alcani ($C_1 - C_7$) în echilibru cu două faze de natură diferită, la aceeași temperatură, în funcție de presiune. De observat convergența curbelor în cele două puncte critice respective ($k_1 = 1$).

lichidă a zăcămintului, iar compoziția lor nu este în legătură cu aceea a gazelor din zona de gaze libere, ci este determinată de caracterul ieșirii din soluție (diferențial sau de contact), de presiunea și de temperatura de separație.

După determinarea compoziției gazelor din zona de gaze libere (fie astfel, fie prin deschiderea eventuală a primei sonde, chiar a zonei de gaze libere, urmată de probe de producție și de analiză), cunoașterea coeficienților lui k_i permite rezolvarea unei importante probleme de exploatare: determinarea valorii pînă la care poate fi scăzută presiunea prin exploa-

tare, fără a se provoca formarea unei faze străine *) și, deci, perioada de timp în care zăcămintul poate fi exploatat fără a fi indispensabilă menținerea presiunii prin injectarea unui agent de deplasare (v. Cap. VI).

Pe aceeași bază a coeficienților de echilibru se poate verifica existența unei comunicații între porțiunile de zăcămint deschise de două sonde de exploatare: comunicația poate fi foarte probabilă dacă compoziția gazelor date de sonda care produce din zona de gaze satisfacă condițiile de echilibru (determinate cu ajutorul coeficienților k_i) cu compoziția fazei lichide (în condiții de fund), extrasă prin sonda care drenează zona de saturație cu fază lichidă **).

Cunoașterea și utilizarea coeficienților k_i permite, deasemenea, rezolvarea unei serii de probleme de extracție, de exemplu, aceea de a se calcula cantitatea de gaze care intră în sondă ca gaze libere, rația efectivă, cum și compoziția fiecăreia, cînd se cunoaște compoziția globală a sistemului (gaze și țiței, la separator) și presiunea dinamică de fund a sondei, procurînd pe această cale elemente necesare rezolvării problemei regimului tehnologic optim al sondei în legătură cu acela al zăcămintului.

Cunoașterea coeficienților de echilibru permite și construcția curbilor de solubilitate a gazelor în țiței.

Determinarea cu ajutorul coeficienților k_i a compoziției fazei gazoase permite, în continuare, determinarea prin calcul a coeficienților de abatere de la legea gazelor perfecte și a coeficienților de variație a volumului la scăderea presiunii, absolut necesari pentru a prevedea și pentru a urmări comportarea zăcămintului în cursul exploatării și al proiectării operațiilor de completare a energiei de zăcămint (numite operații de recuperare secundară, în sensul lărgit al noțiunii).

Prin calculul rației de gaze (exprimată ca n_G/n_L) efective, corespunzătoare unei presiuni finale de extracție oarecare (presiunea de separator), și prin determinarea compoziției celor două faze separate la diferite presiuni, se poate rezolva problema intrucitva contradictorie a obținerii unui țiței stabilizat, a recuperării gazolinei direct în stare lichidă și a folosirii energiei reprezentate de gazele separate sub presiune (v. Cap. X «Extracția prin erupție, separarea gazelor de țiței»).

*) Pentru cazul fazei lichide, țițeiul, în care formarea unei faze diseminate, prin ieșirea gazelor din soluție, provoacă degradarea parțială a zăcămintului, rezolvarea problemei (de mult cunoscută) se efectuează de obicei prin experiențe de laborator (v. B.d.2 a) și B.d.2 c) fig. 210). Pentru cazul fazei gazoase, în care formarea unei faze lichide la fel diseminată în roca-magazin și mult mai legată de aceasta prin forțele molecular-superficiale creează situații uneori încă și mai dăunătoare, problema, relevantă mai recent și mai dificil de tratat experimental se rezolvă, în general, suficient de exact cu ajutorul coeficienților k_i .

**) În toate aceste aplicații, este necesar verificarea probabilității atingerii echilibrului, fără de care folosirea coeficienților k_i nu este întemeiată.

B. PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE COMPONENTILOR SISTEMELOR FLUIDE DIN ZĂCĂMINTELE DE ȚITEI ȘI DE GAZE

a. Apa dulce

Se cunosc în natură trei varietăți chimice ale apei: apa obișnuită H_2O , apa grea D_2O și apa izotopului tritium, T_2O . În studiile curente, prezența apei grele este neglijată, în general, datorită concentrației sale reduse (în medie 0,2%) și puțin variabile. Apa mărilor este puțin mai concentrată decît apele de uscat. Apa are concentrații mai variate în unele lacuri de munte (îndeosebi glaciale) și în lagunele de concentrație. Din cauza dozării dificile (spectoscopie de masă cu raze-canal) și a interesului aparent redus, nu există date asupra conținutului în apa grea a apelor zăcămintelor de hidrocarburi. Prezența apei tritiumului este deocămdată de interes strict teoretic pentru fizica nucleară, concentrația ei în natură fiind de $0,7-1 \cdot 10^{-9}$. Se pare că prezența apei grele a deuteriului (punct de fierbere $+101,42^\circ C$, punct de topire $+3,83^\circ C$) este suficientă pentru a determina unele dintre neconcordanțele constatate la măsurătorile mai precise ale proprietăților fizice ale apei obișnuite.

Proprietățile fizice principale ale apei obișnuite în stare de puritate realizabilă în condițiile de laborator sînt, în condițiile atmosferice standard (760 mm col Hg și $0^\circ C$), următoarele:

- greutatea specifică a apei în stare solidă: $0,9167 \text{ kg/dm}^3$;
- greutatea specifică a apei în stare lichidă: $0,999873 \text{ kg/dm}^3 (\pm 10^{-6} \cdot 0,5)$;
- greutatea specifică a apei în stare gazoasă: $0,00485 \text{ kg/dm}^3$;
- punct de fierbere (prin definiție): $+100^\circ C$;
- punct de topire (prin definiție): $0^\circ C$;
- Indice de refracție: $n \approx 1,332$ (în funcție de lungimea de undă);
- Tensiune de vapori: $\approx 4,58 \text{ mm col Hg}$;
- Permitivitate (permeabilitate dielectrică): ≈ 88 .

1. Proprietățile de stare de agregatie. Se cunosc opt stări de agregatie pentru H_2O și anume: starea gazoasă, starea lichidă și șase varietăți alotropice cristaline, stabile, în domeniile de temperatură și de presiune, reprezentate în fig. 49. Pentru apa grea, diagrama corespunzătoare nu este complet studiată, dar ea pare să fie foarte apropiată de aceea din fig. 49. În această diagramă, din cauza scării mici a presiunilor, domeniul stării gazoase se confundă cu axa absciselor. La o scară corespunzătoare, curba de delimitare dintre domeniile gaz-lichid este reprezentată în fig. 50. Dintre stările solide ale apei, în natură există, practic, numai starea I: este

posibilă și existența stărilor III și IV la baza ghețurilor polare, în condiții particulare de presiune. Se observă că starea VI a gheții este stabilă chiar la temperaturi mai mari decât + 80°C, la presiuni suficient de mari.

cu erori de ordinul a câteva procente pentru + 95°C < t° < 230°. O reprezentare mai exactă este dată prin ecuația:

$$\text{Log}_e \frac{P_c}{P_v} = \frac{a_0 + (T - T')^2 (\alpha + \beta T)}{T_c/T - 1} \quad (49)$$

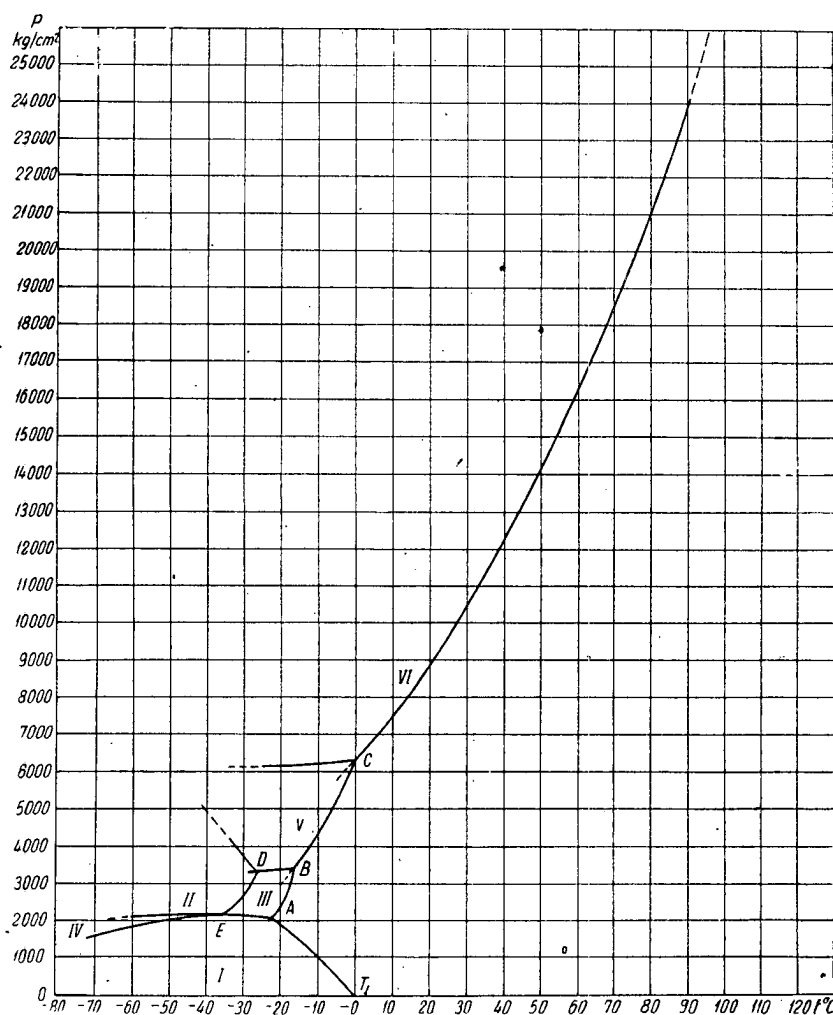


Fig. 49. Domeniile (P, t°) de stabilitate ale diferitelor stări de agregare ale apei. Domeniul de stabilitate al fazei gazoase se confundă cu axa absciselor, din cauza scăzii mici a presiunilor: L — domeniul de stabilitate al fazei lichide (pentru limita sa la presiunile joase, v. fig. 50); I — domeniul de stabilitate al fazei cristaline I gheață obișnuită; II — domeniul de stabilitate al fazei cristaline II; III — domeniul de stabilitate al fazei cristaline III; IV — domeniul de stabilitate al fazei cristaline IV; V — domeniul de stabilitate al fazei cristaline V; VI — domeniul de stabilitate al fazei cristaline VI; T — punctul triplu al apei.

Tensiunea de vapori sau limita domeniilor (de P și t°) gaz-lichid este reprezentată în fig. 50. Ea poate fi reprezentată aproximativ prin legea:

$$P = \left(\frac{t}{100} \right)^4 \quad (48)$$

în care:

P_c este presiunea critică a apei: 225,22 kg/cm²;
 T_c — temperatura critică a apei: 374,2 ± 0,1°C;

T — temperatura absolută curentă la care se caută tensiunea de vapori, în $^{\circ}\text{K}$;
 P_v — tensiunea de vapori, în kg/cm^2 ;
 Constantele din ecuația (49) au, respectiv, valorile:

În intervalele de temperatură respective, ecuația (49) dă pe P_v cu o eroare relativă inferioară lui 10^{-4} (v. și tabela 6).

În realitate, curba tensiunii de vapori a fazei lichide nu atinge temperatura de 0°C , ci se termină în punctul T din fig. 49, respectiv

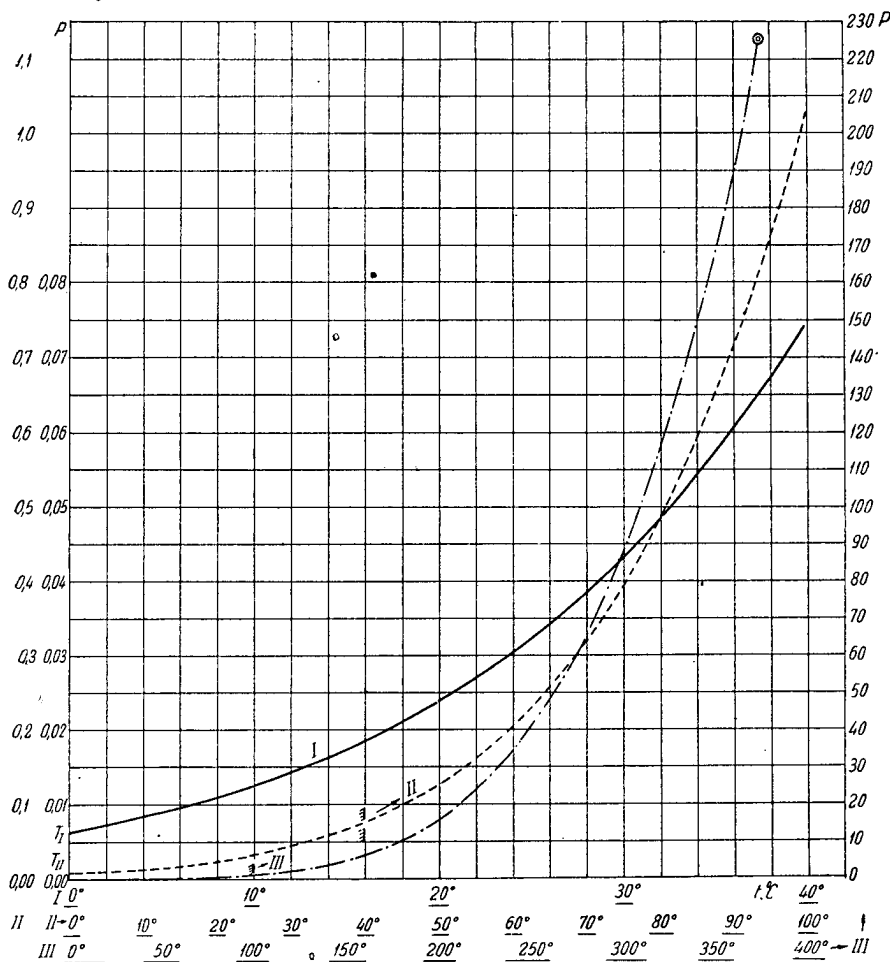


Fig. 50. Reprezentarea limitei de stabilitate a domeniilor vapor-lichid ale apei (curba tensiunii de vapori): I — în linie continuă, gama $0^{\circ}\text{C} < t^{\circ} < 40^{\circ}\text{C}$ (scara $P = 0-0,08 \text{ kg}/\text{cm}^2$); II — în linie întreruptă, gama $0^{\circ}\text{C} < t^{\circ} < 100^{\circ}\text{C}$ (scara $P = 0-1,10 \text{ kg}/\text{cm}^2$); III — în punct-linie-punct, gama $0^{\circ}\text{C} < t^{\circ} < 380^{\circ}\text{C}$ (scara $P = 0-230 \text{ kg}/\text{cm}^2$; T_t = punctul triplu al apei. A se compara cu fig. 34, planul P, T , curba $A'E'C'$.

1) în intervalul de temperatură $0 \dots + 200^{\circ}\text{C}$;

$$\alpha_0 = 7,211\,000; \quad \alpha = 86\,000;$$

$$\beta = 40; \quad T' = 482;$$

2) în intervalul de temperatură $+ 200 \dots + 374^{\circ}\text{C}$;

$$\alpha_0 = 7,209\,840; \quad \alpha = 274\,500;$$

$$\beta = -334; \quad T' = 488.$$

T_t din fig. 50, punctul triplu al apei, ale cărui coordonate ($t^{\circ} = + 0,007^{\circ}\text{C}$ și $P_v = 0,00605 \text{ kg}/\text{cm}^2$, după alți cercetători $t^{\circ} = 0,0097^{\circ}\text{C}$ și $P = 0,00622$) se confundă, practic, cu acelea ale punctului de topire la presiunea atmosferică.

Transformarea de fază făcându-se cu schimb de căldură latentă, valoarea specifică a acesteia poate fi determinată cu relația (1), în care $\partial P_v / \partial T$ este derivata funcției $P_v = f(T)$;

Tabela 6. Tensiunea de vapori a apei

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,006228	0,006694	0,007193	0,007723	0,008 289	0,008890	0,009530	0,010210	0,010932	0,011699
10	0,012513	0,013376	0,014291	0,015261	0,016 289	0,017376	0,018527	0,019745	0,02103	0,02239
20	0,02383	0,02534	0,02694	0,02863	0,030 41	0,03229	0,03426	0,03634	0,03853	0,04083
30	0,04325	0,04580	0,04847	0,05128	0,054 23	0,05733	0,06057	0,06398	0,06755	0,07129
40	0,07520	0,07930	0,08360	0,08809	0,092 79	0,09771	0,10294	0,10821	0,11382	0,11967
50	0,12578	0,13216	0,13881	0,14575	0,152 98	0,16051	0,16835	0,17653	0,18504	0,19390
60	0,2031	0,2127	0,2230	0,2338	0,243 8	0,2550	0,2666	0,2787	0,2912	0,3042
70	0,3177	0,3317	0,3463	0,3613	0,376 9	0,3931	0,4098	0,4272	0,4451	0,4637
80	0,4829	0,5028	0,5234	0,5447	0,566 7	0,5894	0,6129	0,6372	0,6623	0,6882
90	0,7149	0,7425	0,7710	0,8004	0,830 7	0,8619	0,8942	0,9274	0,9616	0,9969
100	1,0332	1,0707	1,1092	1,1489	1,1898	1,2318	1,2751	1,3196	1,3654	1,4125
110	1,4609	1,5106	1,5718	1,6144	1,6684	1,7236	1,7809	1,8394	1,8995	1,9612
120	2,0245	2,0895	2,1561	2,2245	2,2947	2,3666	2,4404	2,5160	2,5935	2,6730
130	2,7544	2,8378	2,9233	3,011	3,101	3,192	3,286	3,382	3,481	3,582
140	3,685	3,790	3,898	4,009	4,122	4,237	4,355	4,476	4,599	4,725
150	4,854	4,985	5,120	5,257	5,397	5,540	5,686	5,826	5,989	6,144
160	6,302	6,464	6,630	6,798	6,970	7,146	7,325	7,507	7,693	7,883
170	8,076	8,275	8,475	8,679	8,888	9,101	9,317	9,538	9,763	9,992
180	10,225	10,462	10,703	10,960	11,201	11,456	11,715	11,979	12,248	12,522
190	12,800	13,083	13,371	13,664	13,962	14,265	14,573	14,886	15,204	15,528
200	15,857	16,192	16,532	16,877	17,228	17,585	17,948	18,316	18,690	19,070
210	19,456	19,848	20,246	20,651	21,061	21,477	21,901	22,331	22,767	23,209
220	23,659	24,115	24,577	25,047	25,523	26,007	26,497	26,995	27,499	28,011
230	28,531	29,057	29,591	30,133	30,682	31,239	31,803	32,375	32,955	33,544
240	34,140	34,745	35,357	35,978	36,607	37,244	37,890	38,545	39,208	39,880
250	40,56	41,25	41,95	42,66	43,37	44,10	44,83	45,58	46,33	47,09
260	47,87	48,65	49,44	50,24	51,05	51,88	52,71	53,55	54,40	55,26
270	56,14	57,02	57,91	58,82	59,73	60,66	61,60	62,55	63,51	64,48
280	65,46	66,45	67,46	68,47	69,50	70,54	71,59	72,65	73,73	74,82
290	75,92	77,03	78,15	79,29	80,44	81,60	82,78	83,97	85,17	86,38
300	87,61	88,85	90,11	91,38	92,66	93,95	95,26	96,59	97,93	99,28
310	100,64	102,02	103,42	104,83	106,26	107,69	109,15	110,62	112,11	113,61
320	115,13	116,66	118,21	119,77	121,35	122,95	124,56	126,19	127,84	129,50
330	131,18	132,88	134,59	136,33	138,08	139,85	141,63	143,44	145,26	147,10
340	148,96	150,84	152,73	154,65	156,59	158,54	160,52	162,52	164,53	166,57
350	168,63	170,71	172,81	174,93	177,07	179,24	181,43	183,64	185,88	188,13
360	190,42	192,72	195,06	197,41	199,80	202,21	204,64	207,11	209,60	212,12
370	214,68	217,3	219,9	222,5	225,2	—	—	—	—	—

definită în acest caz prin ecuația (49) și folosind valorilor V și v din tabela 7.

Pentru calcule analitice, v , volumul specific al fazei lichide, poate fi dedus din reciproca valorii greutatei specifice $\gamma = \rho \cdot g$, unde ρ este masa specifică, iar g — accelerația gravitației:

$$g = 980,616 - 2,5928 \cos L - 3,086 \cdot 10^{-4} z \quad (50)$$

unde:

- L este latitudinea, în grade sexagesimale;
- z — altitudinea, în m;
- g — accelerația gravitației, în cm/s^{-2} .

Pentru apă, la latitudinea de 45° , ρ este dat de funcția:

$$\rho = 0,999\,973 \left[1 - \frac{(t - 3,98)^2}{503\,570} \cdot \frac{t + 283}{t + 67,26} \right] \quad (51)$$

valabilă cu o eroare mai mică decât 10^{-4} , între 0° și $+42^\circ\text{C}$, sau de

$$\rho = 0,999\,973 \left[1 - \frac{(t - 3,982)^2}{466\,700} \times \frac{t + 273}{t + 67} \cdot \frac{350 - t}{365 - t} \right] \quad (52)$$

valabilă între $+17^\circ$ și 102° , cu aproximativ aceeași eroare, la presiunea atmosferică.

În natură, volumul specific al fazei solide variază puțin cu temperatura și cu presiunea, însă, variază mult cu conținutul de gaze dizolvate (v. și Cap. IV B.d.2.b.).

Volumul specific al fazei vapori saturanți este dat în tabela 8 și, împreună cu volumul fazei lichide, în fig. 51.

Volumul specific al fazei lichide în echilibru cu vapori este reprezentat și în ramura de curba OA din fig. 52. La presiuni mai mari

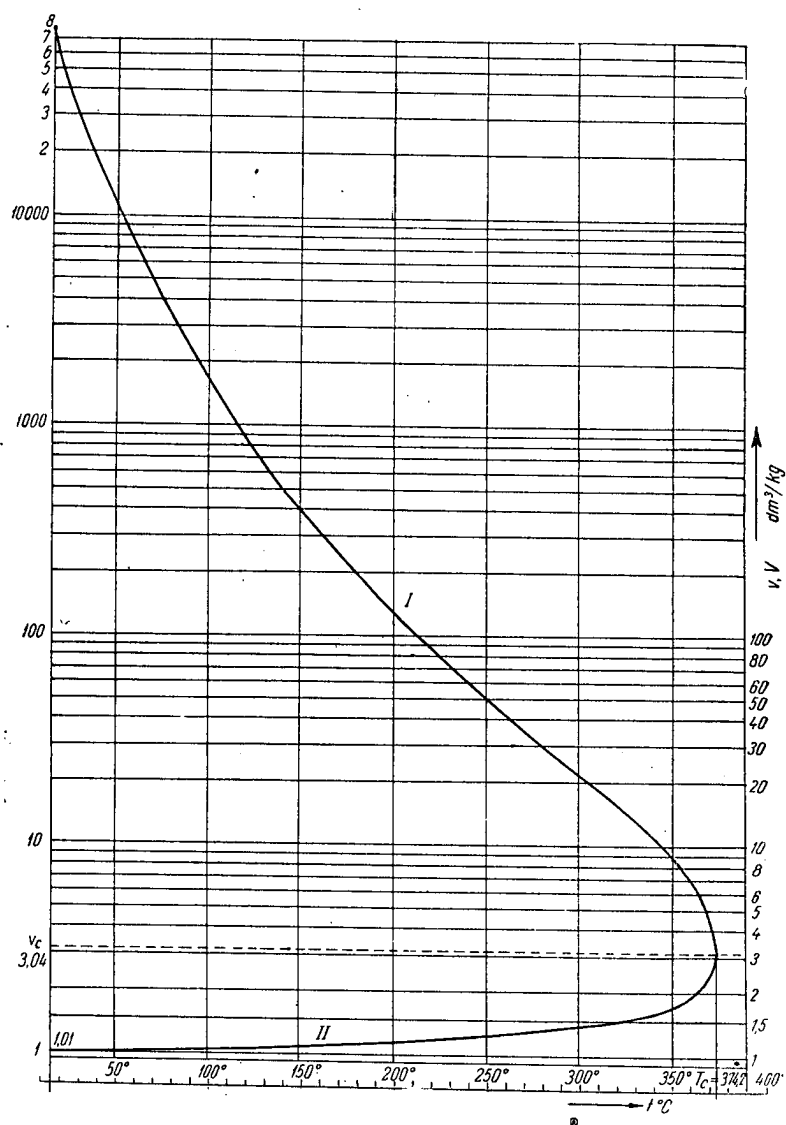


Fig. 51. Volumul specific al apei în fazele lichid și vapori saturați, în echilibru, în funcție de temperatură: I — ramura V , volumul specific al fazei vapori; II — ramura v , volumul specific al fazei lichide; C de coordonate V_c și T_c — punctul critic al apei.

decît presiunea de saturație, el este dat de familia de curbe de temperatură constantă

Tabela 7. Volumul specific al fazelor lichid și vapori saturați în echilibru, în funcție de temperatură

Tempe- ratură, °C	Volumul specific		Tempe- ratură, °C	Volumul specific	
	Apa, dm ³ /kg, v'	Vapori, m ³ /kg, v''		Apa, dm ³ /kg, v'	Vapori, m ³ /kg, v''
0	1,0002	206,3	65	1,0199	6,206
5	1,0000	147,2	70	1,0228	5,049
10	1,0004	106,4	75	1,0258	4,136
15	1,0010	77,99	80	1,0290	3,410
20	1,0018	57,84	85	1,0323	2,830
25	1,0030	43,41	90	1,0359	2,361
30	1,0044	32,93	95	1,0396	1,981
35	1,0061	25,25	100	1,0435	1,673
40	1,0079	19,55	105	1,0474	1,419
45	1,0099	15,28	110	1,0515	1,210
50	1,0121	12,05	115	1,0558	1,036
55	1,0145	9,584	120	1,0603	0,8914
60	1,0171	7,682	125	1,0650	0,7701
130	1,0697	0,6680	265	1,2888	0,03870
135	1,0746	0,5817	270	1,3023	0,03557
140	1,0798	0,5084	275	1,3169	0,03272
145	1,0850	0,4459	280	1,3321	0,03010
150	1,0906	0,3924	285	1,3484	0,02771
155	1,0963	0,3464	290	1,3655	0,02552
160	1,1021	0,3068	295	1,3837	0,02350
165	1,1082	0,2724	300	1,4036	0,02163
170	1,1144	0,2426	305	1,4250	0,01991
175	1,1210	0,2166	310	1,448	0,01830
180	1,1275	0,1939	315	1,472	0,01682
185	1,1345	0,1739	320	1,499	0,01544
190	1,1415	0,1564	325	1,529	0,01415
195	1,1490	0,1410	330	1,562	0,01295
200	1,1565	0,1273	335	1,598	0,01183
205	1,1645	0,1151	340	1,641	0,01076
210	1,1728	0,1043	345	1,692	0,009759
215	1,1812	0,09472	350	1,747	0,008803
220	1,1900	0,08614	355	1,814	0,007875
225	1,1991	0,07845	360	1,907	0,006963
230	1,2088	0,07153	365	2,03	0,00606
235	1,2186	0,06530	370	2,23	0,00500
240	1,2291	0,5970	371	2,30	0,00476
245	1,2400	0,05465	372	2,38	0,00450
250	1,2512	0,05006	373	2,50	0,00418
255	1,2629	0,04591	374	2,79	0,00365
260	1,2755	0,04213	374,2	3,04	0,00304

din fig. 52*) și reprezintă și « coeficientul de volum » din terminologia exploataării zăcămin-

telor de petrol, între condițiile de zăcămint și cele de suprafață standard**).

Pentru presiunile de 1 000—12 000 kg/cm² și pentru temperaturi moderate (0—80°C) v. tabela 8.

Vapori de apă nesaturați au o comportare (11) destul de diferită de aceea a unui gaz perfect.

Valoarea volumului lor specific, în funcție de temperatură, este dată în fig. 53.

Variația volumului specific al apei lichide cu temperatura, la presiune constantă, este definită prin coeficientul de dilatare, mai ușor decît prin ecuația de stare (11), care nici nu poate fi scrisă decît pe intervale mici de temperatură și de presiune. Acest coeficient este dat de relația

$$\alpha_t = \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (53)$$

în care:

α_t este coeficientul de dilatare la temperatura t (formal, mediu între t și $t + \partial t$);

v — volumul specific al apei la aceeași temperatură;

$\frac{\partial v}{\partial t}$ — derivata parțială a funcției (11) ipotetică a apei.

Valorile coeficientului de dilatare α sînt date în fig. 54 ca funcții de temperatură și de presiune.

În practică se folosesc valorile medii ale lui α_t , definit de relația

$$\alpha_t = \frac{1}{v} \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad (54)$$

și care sunt date în fig. 55.

Tabela 8. Volumul specific al apei la presiuni mari, în funcție de temperatură și de presiune

Presiune, kg/cm ²	Temperatură, °C								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
1	1,0001	1,0002	1,0017	1,0042	1,0077	1,0119	1,0169	1,0225	1,0288
1 000	0,9579	0,9603	0,9631	0,9664	0,9701	0,9744	0,9792	0,9843	0,9897
2 000	0,9261	0,9294	0,9328	0,9365	0,9404	0,9446	0,9490	0,9538	0,9586
4 000	0,8508	0,8544	0,8581	0,8619	0,8657	0,8697	0,8738	0,8781	0,8824
6 000	0,8481	0,8510	0,8546	0,8585	0,8624	0,8663	0,8703	0,8743	0,8782
8 000			0,8276	0,8320	0,8361	0,8400	0,8439	0,8478	0,8514
10 000				0,8108	0,8150	0,8189	0,8227	0,8265	0,8301
12 000					0,7967	0,8006	0,8044	0,8081	0,8116

*) Tentativa de a determina volumul specific al apei printr-o funcție de forma $v = v_0 \exp(P_0 - P)$ reprezintă numai o aproximație folosită uneori în hidraulica mediilor poroase (v. cap. II. E) care, însă, nu este satisfăcătoare decît în domeniul relativ restrîns, β nefiind constant (v. fig. 60).

**) În realitate, față de condițiile atmosferice de densitate maximă, 760 mm col. Hg și + 3,98°C, pentru problemele de exploatare, diagrama poate fi considerată în mod practic că se referă la 0° și la 760 mm col. Hg, eroarea relativă fiind $\frac{1}{0,999873}$.

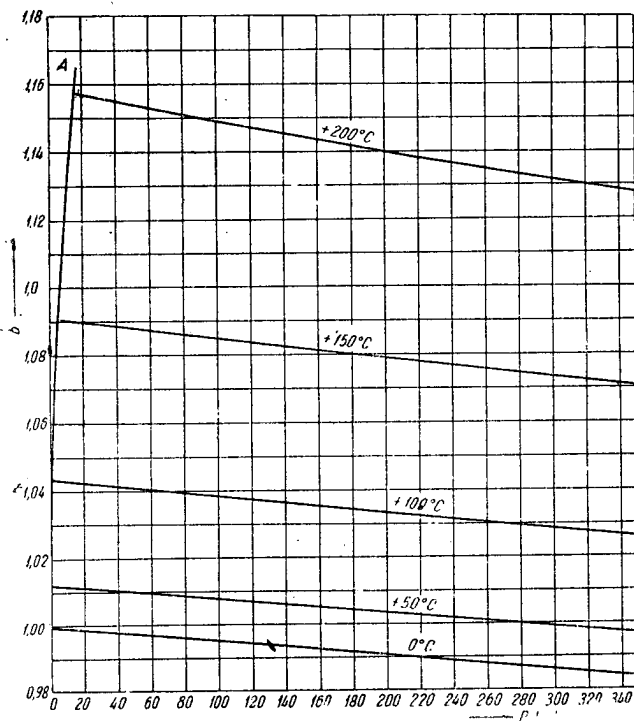


Fig. 52. Coeficientul de volum al apei $b_d = V(P, t) / V_a$ între condițiile (P și t°) de zăcămint și cele de suprafață (760 mm col. Hg și $+ 3,98^\circ\text{C}$): OA — curba volumului specific în condițiile de saturație.

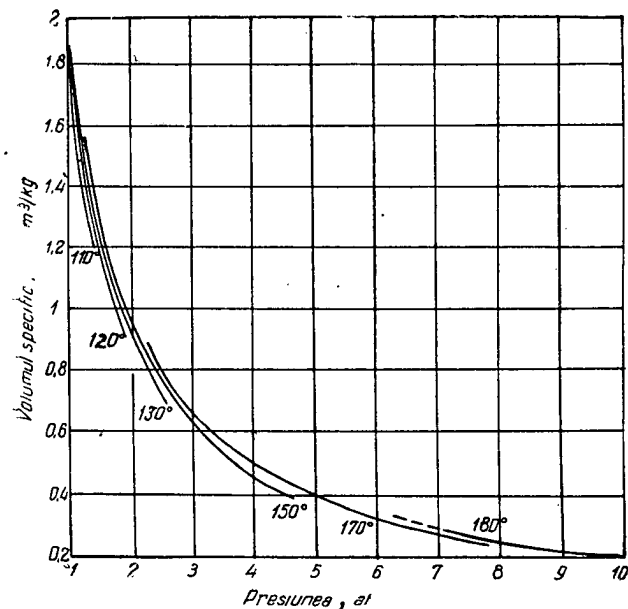


Fig. 53. Volumul specific al vaporilor de apă nesaturați, în funcție de temperatură: C — punctul critic al apei; AC — curba volumului specific al vaporilor saturați.

În starea solidă, coeficientul de dilatare al apei este ca și al apei lichide, aproape independent de presiune (tabela 9).

Tabela 9. Coeficientul de dilatare liniară al apei în stare solidă, în funcție de temperatură

Temperatura, $t^\circ\text{C}$	Coeficientul de dilatare, $10^{-5} (^\circ\text{C})^{-1}$
0	9,1
-5	7,1
-10	5,5
-15	4,6
-20	3,9
-25	3,4

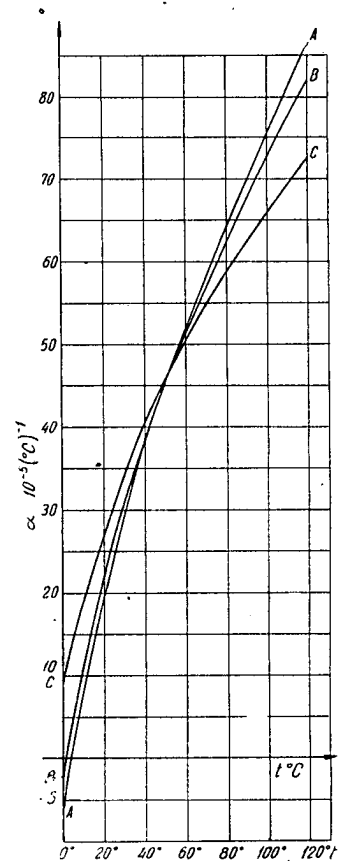


Fig. 54. Coeficientul de dilatare al apei lichide, în funcție de temperatură, în unități: $10^{-5} (^\circ\text{C})^{-1}$. A—A—la presiunea atmosferică; B—B—la presiunea de 100 kg/cm^2 (ef); C—C—la presiunea de 500 kg/cm^2 (ef).

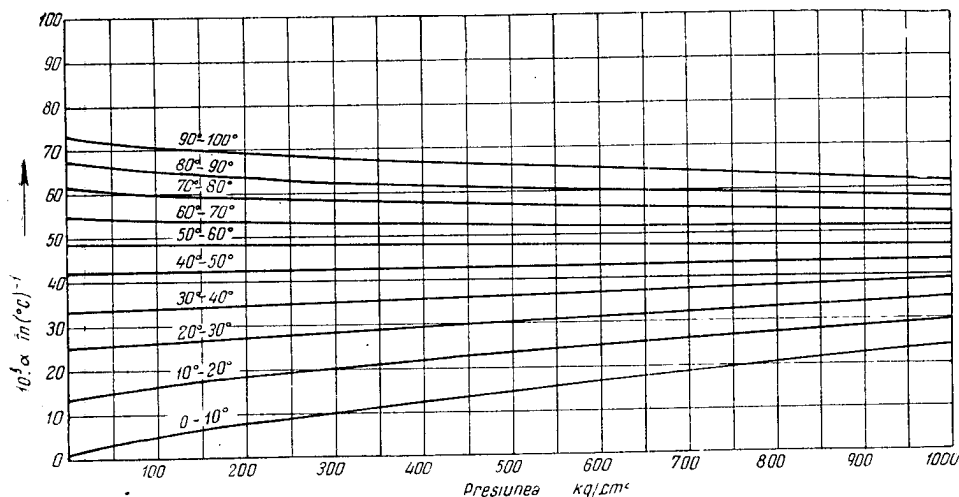


Fig. 55. Coeficientul mediu de dilatare al apei în starea lichidă, în funcție de presiune (valorile medii pe cele zece intervale egale de temperatură între 0° și 100°C).

În starea gazoasă, coeficientul de dilatare al apei este o funcție puțin folosită (cu excepția domeniului presiunilor foarte joase). El poate fi dedus ca valoare medie din coeficienții unghiulari ai curbelor din fig. 53, iar pentru presiuni foarte joase $\alpha \approx \frac{1}{273}$.

Din cauza neregularității ei deosebite, legea generală de stare nu poate fi exprimată analitic, suficient de simplu și de exact, în același timp, pentru scopuri practice. Grafic, ea poate fi reprezentată ca în fig. 56 și 57. Fig. 56 reprezintă ca detaliu domeniul temperaturilor uzuale și al presiunilor relativ joase.

Pentru necesități de detaliu, exprimând legea de stare a vaporilor nesaturați sub forma:

$$V = \frac{47,06 - \varepsilon}{P} \cdot T, \quad (55)$$

unde V este volumul specific al vaporilor, în m^3/kg ;

P — presiunea, în kg/m^2 ;

T — temperatura absolută, în $^\circ\text{K}$;

ε — un termen de corecție având rolul coeficientului Z din relația (27),

se poate determina V , cu ajutorul valorilor lui ε din fig. 58 și 59 *).

Pentru presiuni de ordinul atmosferei, eroarea relativă cu privire la volumul specific, comisă luând $\varepsilon = 0$, este de ordinul 1,3% și scade foarte repede cu presiunea, astfel încât

la presiuni inferioare celei atmosferice vaporii nesaturați pot fi considerați practic din punct-

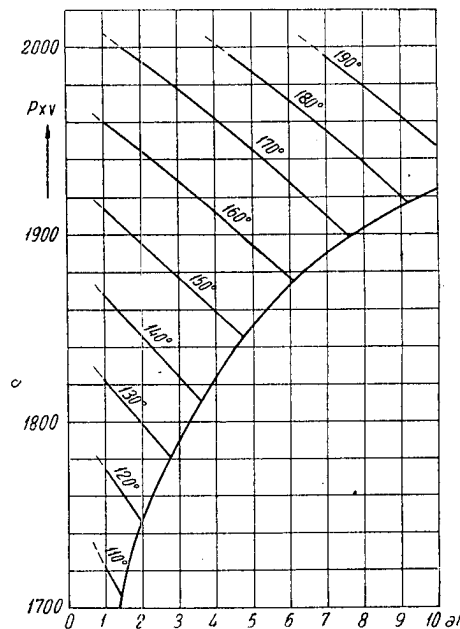


Fig. 56. Reprezentarea legii de stare (11) a apei sub forma $Pv = f(P, t^\circ)$, în domeniul $1 < P < 10 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (ef) și $110^\circ\text{C} < t < 190^\circ\text{C}$ (aburi de joasă și de medie presiune).

*) Diagrama este calculată de Stodola, pe baza unor date experimentale mai vechi care admiteau că presiunea critică a apei este de 224 at $\approx 230,6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, în loc de valoarea actuală de 225, 2 kg/cm^2 , astfel încât în domeniul critic trebuie corectată pentru presiune.

mul de vedere al comportării de volum, ca gaz perfect.

2. Proprietățile elastice. a) Variația volumului specific cu presiunea, definită de legile

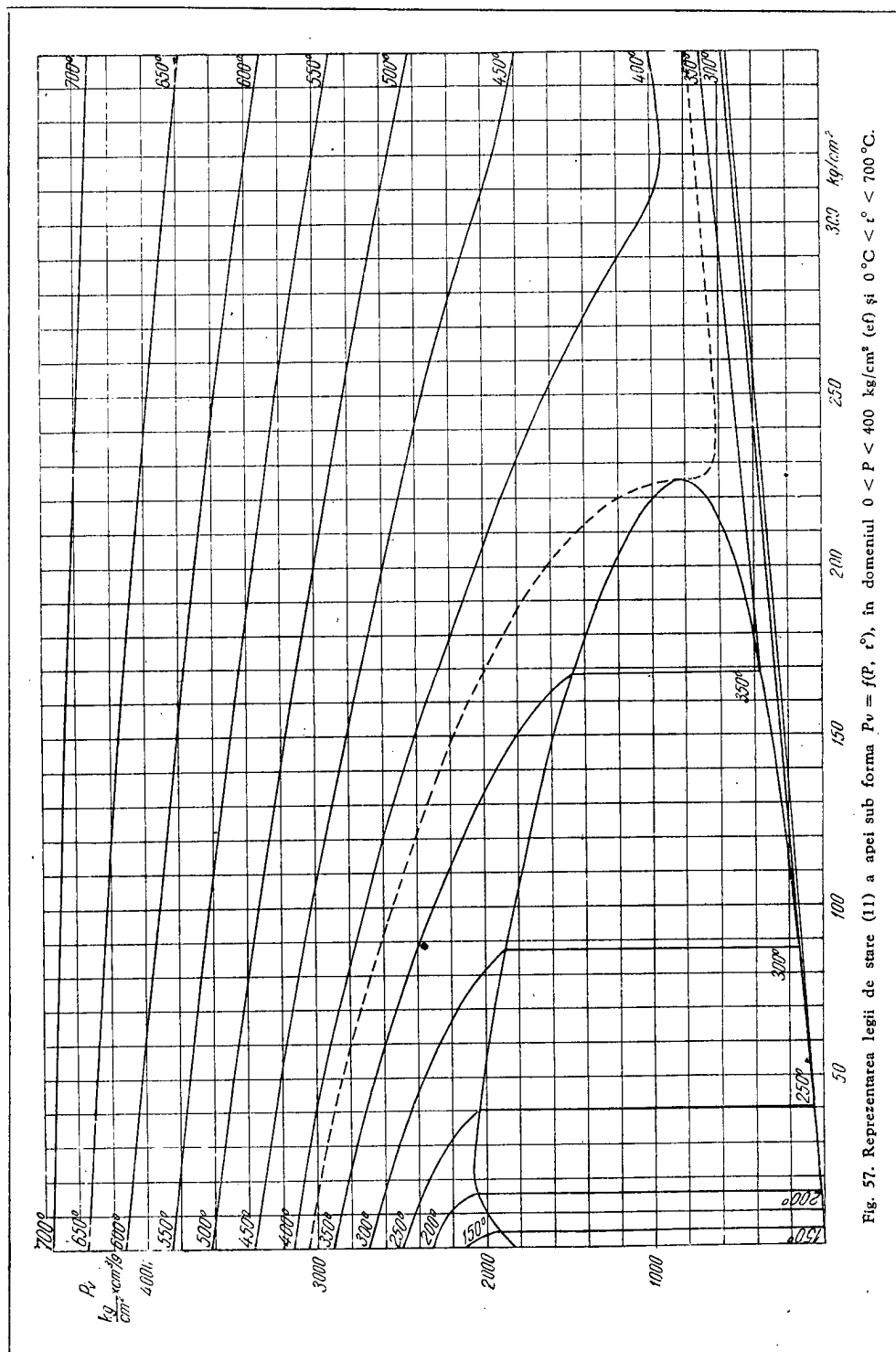


Fig. 57. Reprezentarea legii de stare (11) a apei sub forma $P_v = f(P, t^\circ)$, în domeniul $0 < P < 400 \text{ kg/cm}^2$ (ef) și $0^\circ\text{C} < t^\circ < 700^\circ\text{C}$.

parțiale de stare expuse, este studiată mai detaliat în hidraulică cu ajutorul coeficientului de compresibilitate β , calculat cu relația:

$$\beta = -\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial p} \quad (56)$$

Încercările de a formula o lege generală de forma

$$v = v_0 P^{-b_0} \cdot e^{-a(P-P_0)} [1 + \alpha(t-t_0)] \quad (III 43)$$

nestabilizată (v. Cap. II.E.a.5), sînt date în fig. 60.

Mai reprezentative pentru transformările izoterme, pentru compresii sau pentru detente sînt curbele β din fig. 61 care, însă, nu pot fi citite ușor în regiunea fasciculului de izoterme 30 ... 70 °C, regiune în care coeficientul de compresibilitate a apei prezintă un minim, astfel încît izotermele de β nu numai că nu se succed în ordine, dar se și întretaie.

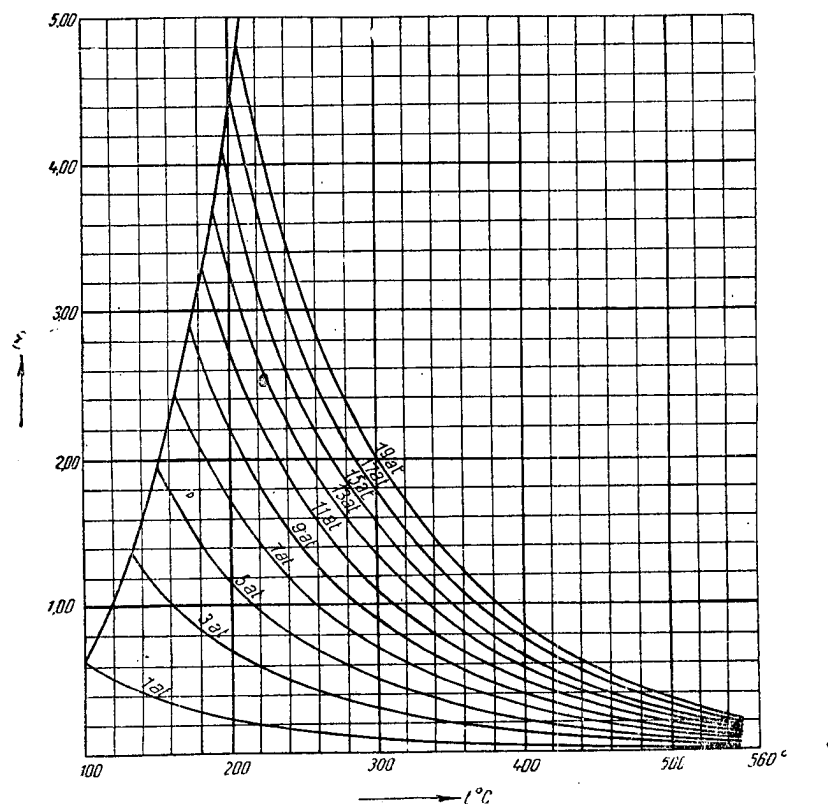


Fig. 58. Valorile coeficientului β pentru intervalul de presiuni $0 < P < 19$ ata = 18,62 kg/cm².

nu au reușit, neputîndu-se obține coeficienții a , b , și α constanți și unici în toată gama presiunilor și a temperaturilor studiate.

Din această cauză, valoarea lui β , definită de relațiile (56) și (III 43).

$$\beta = -a - \frac{b_0}{P - P_0} \quad (III 44)$$

nu poate fi acceptată decît în cazul problemelor particulare care cuprind variații restrinse de presiune și de temperatură.

Valorile exacte determinate experimental ale compresibilității β a apei în faza lichidă, necesare în cazul problemelor de curgere

Fenomenele de compresie și de detentă care se produc în zăcăminte au, practic, caracterul unor transformări izoterme, pentru care sînt valabili coeficienții β dați pînă aci. Fenomenele care au loc în pompe și în conducte, însă, din cauza vitezei relativ mari, pot fi considerate uneori ca transformări adiabatice.

În aceste condiții, apa comprimată se încălzește, ceea ce, prin dilatare, reduce compresibilitatea aparentă a apei. Deși încălzirea care se produce este numai de ordinul miilor de grad Celsius, efectul este suficient de intens pentru a provoca schimbări fundamentale în cazul propagării undelor elastice în conducte, al loviturilor de berbec etc.

Diferența dintre coeficientul de compresibilitate izotermă β_t , și coeficientul de compresibilitate adiabatică β_a , poate fi calculată cu relația

$$\beta_t - \beta_a = \frac{T}{A} \cdot \frac{\alpha^2 v}{C_p} \quad (57)$$

domeniul de comportare anormală, α fiind negativ, compresiunea adiabatică are ca efect o scădere a temperaturii.

În fig. 62 sînt reprezentate încălzirile prin compresiune adiabatică ale apei în funcție de temperatura medie, efectul fiind practic independent de presiunea inițială.

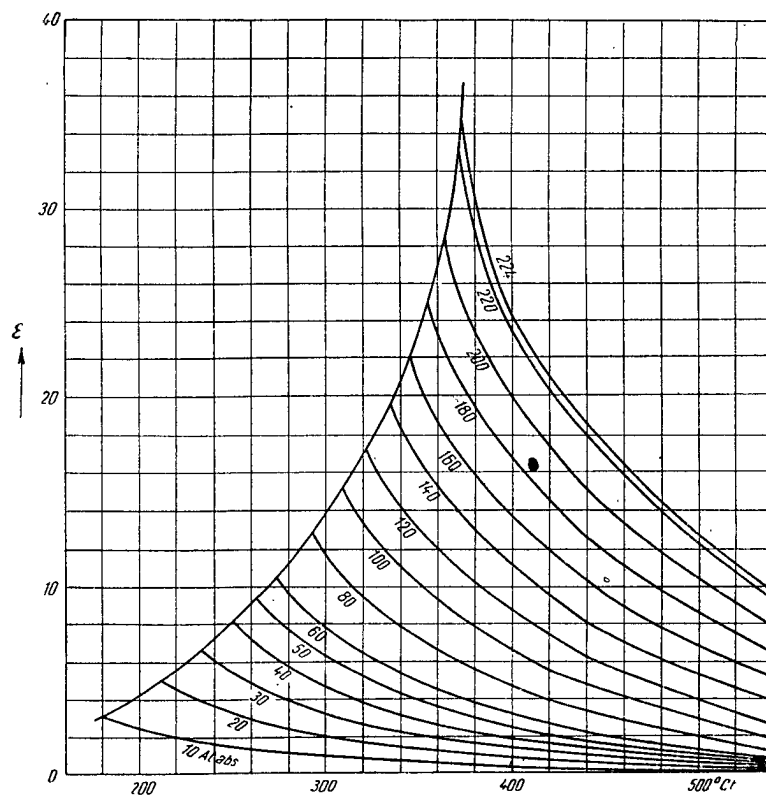


Fig. 59. Valorile coeficientului ε , pentru intervalul de presiune 10 ata < P < 224 ata

în care:

- T — temperatura absolută, în °K;
- A — echivalentul mecanic al caloriei, în m·kg/kcal;
- α — coeficientul de dilatare termică pentru volum al apei, în °C⁻¹;
- v — volumul specific al apei, în m³/kg;
- C_p — căldura specifică sub presiune constantă a apei, în kcal/(grad C×kg);
- β_t și β_a — coeficienții de compresibilitate respectivi, în m²/kg, în sistemul MKS, urmînd a fi multiplicați cu 10⁶, pentru a se obține β în cantitățile obișnuite (cm²/kg).

Trebuie menționat că încălzirea prin compresiune adiabatică are loc efectiv numai în domeniul de temperaturi, în care coeficientul de dilatare termică al apei este pozitiv. În

Diferențele care rezultă conform relației (57) între β_t și β_a sînt reprezentate în fig. 63 și 64.

Cu toată încălzirea redusă, din cauza valorii absolute foarte mici a coeficienților β_t și β_a diferențele lor reprezintă valori relative importante (0%—30%), astfel încît în calculul hidraulic al conductelor supuse la lovituri de berbec nu este permisă neglijarea lor (v. și Cap. IV B.a.2.b).

b) Viteza de propagare a oscilațiilor elastice. Oscilațiile elastice se propagă în apă dacă mediul nu este limitat de pereți apropiați (bazine mari, lacuri, mări și oceane) cu viteza a determinată cu relația

$$a = \sqrt{\frac{g}{\gamma \cdot \beta}} \quad (58)$$

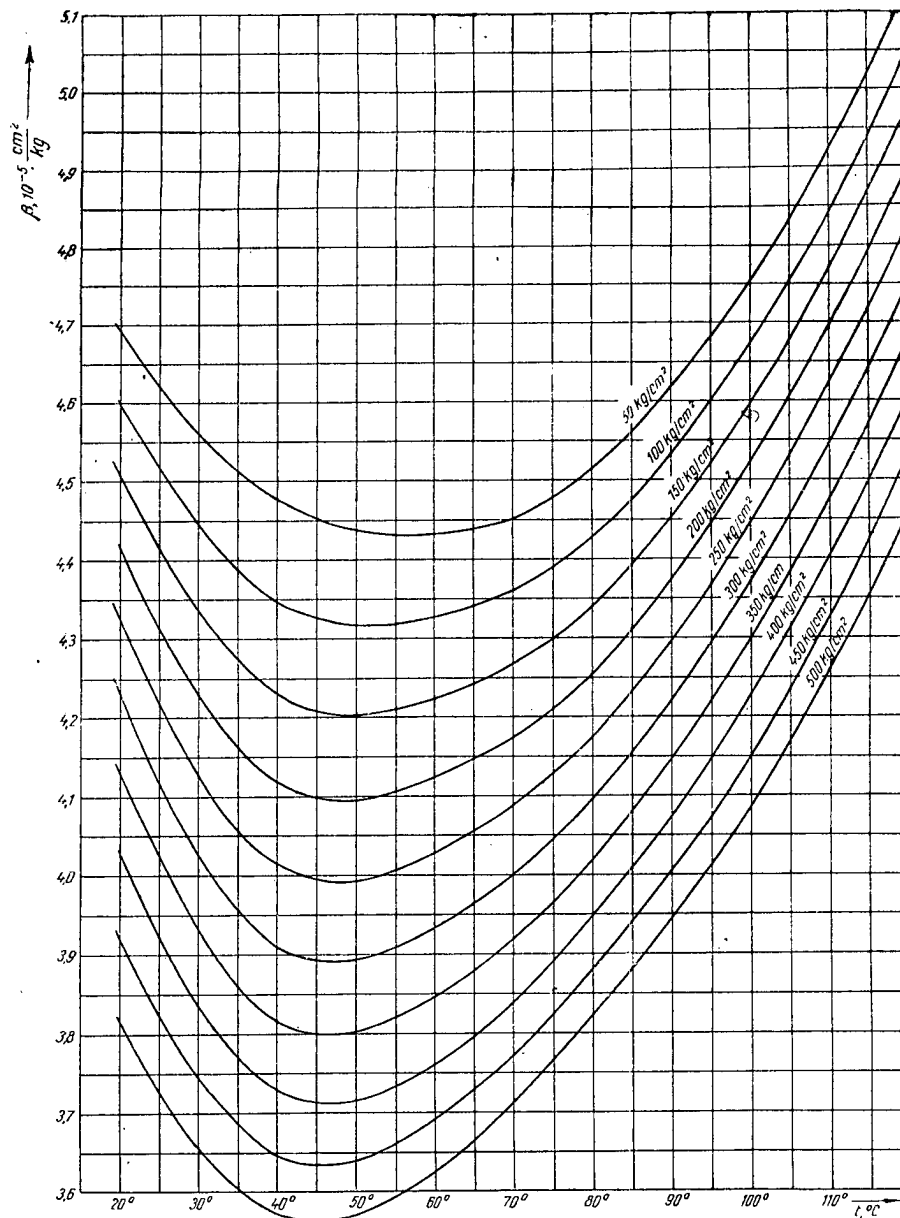


Fig. 60. Valorile coeficientului de compresibilitate $\beta \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{kg}$ al apei în domeniul de temperaturi și de presiuni întâlnite în zăcămintele de petrol și de gaze, în funcție de temperatură.

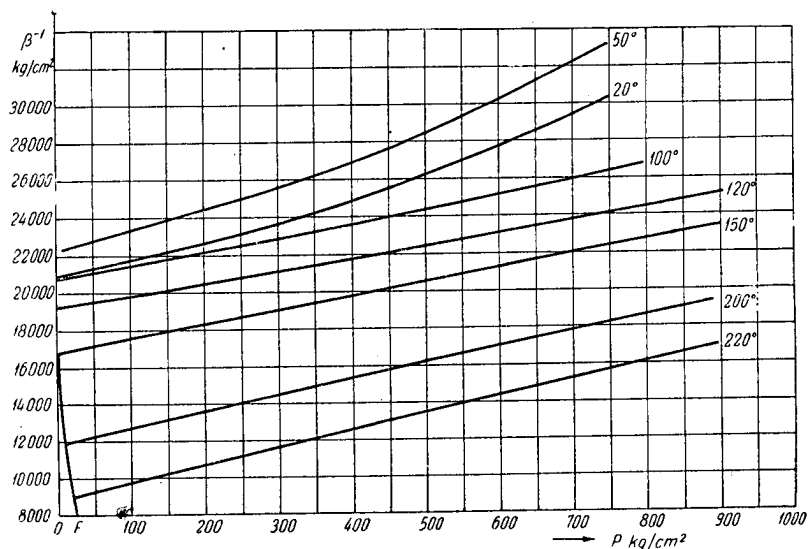


Fig. 61. Variația în funcție de presiunea coeficientului β al apei, la diferite temperaturi constante:
FA — curba-limită a domeniului de stabilitate a fazei de vapor.

Observație. În ordonată sînt raportate valorile $1/\beta$ care au dimensiunile unei presiuni.

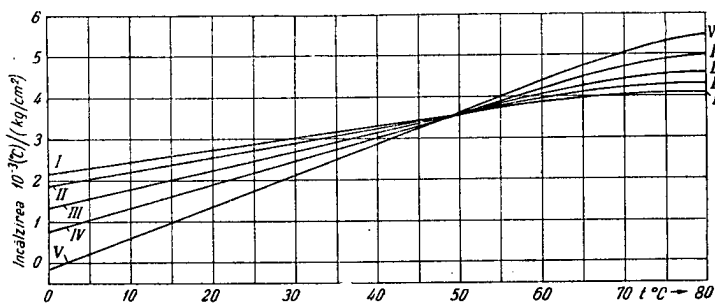


Fig. 62. Încălzirea apei lichide prin compresiune adiabatică cu 1 kg/cm^2 , în funcție de temperatură (valorile reprezentate sînt informative, precizia lor fiind limitată de dificultatea de a măsura variații de temperatură foarte mici și rapide), în miimi de $^{\circ}\text{C}$. I — curba încălzirii prin compresiune de la o presiune inițială de 2000 kg/cm^2 ; II — curba încălzirii prin compresiune de la o presiune inițială de 1500 kg/cm^2 ; III — curba încălzirii prin compresiune de la o presiune inițială de 1000 kg/cm^2 ; IV — curba încălzirii prin compresiune de la o presiune inițială de 500 kg/cm^2 ; V — curba încălzirii prin compresiune de la o presiune inițială de 1 kg/cm^2 .

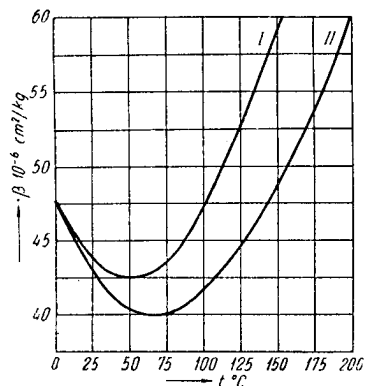
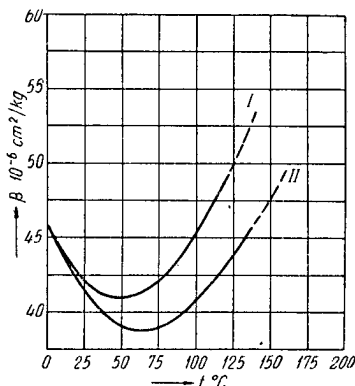


Fig. 63. Variația cu temperatura a coeficienților β_t și β_a ai apei, la presiunea atmosferică: I — curba β_t ; II — curba β_a .

Fig. 64. Variația în funcție de temperatură, a coeficienților β_t și β_a ai apei, la presiunea de 100 kg/cm^2 . I — curba β_t ; II — curba β_a .



unde:

- a este viteza de propagare, în m/s;
 g — accelerația gravitației, în m/s;
 γ — greutatea specifică a mediului (apei), în kg/m³;
 β — coeficientul de compresibilitate, în m²/kg.

Experiența arată că β are o valoare intermediară între β_t și β_a , dar mult mai apropiată de β_a . În spații închise și mai ales în conducte, viteza de propagare este diferită și se determină cu relația:

$$a = \sqrt{\frac{g}{\gamma \left(\beta + \frac{d}{E\delta} \right)}} \quad (59)$$

unde:

- δ este grosimea peretelui conductei, în m;
 d — diametrul interior al conductei, în m;
 E — modulul de elasticitate al materialului conductei, în kg/m².

Se observă că a variază cu temperatura, din cauză că variază atât β_t , cât și $\beta_a - \beta_t$ cu valori relative importante (variațiile lui γ , d , δ și în general, E , cu temperatura, sînt din acest punct de vedere neglijabile).

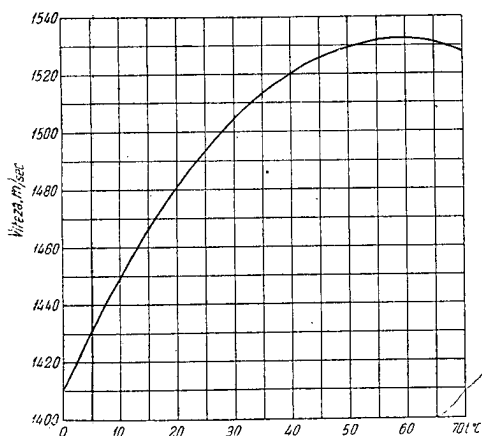


Fig. 65. Variația în funcție de temperatură, a vitezei de propagare în apă (lichid) a oscilațiilor elastice.

Viteza de propagare a sunetului în apă în faza lichidă, în mediu nelimitat și la presiunea atmosferică, are variația indicată în fig. 65. Ea corespunde aproximativ legii:

$$\ddot{a} = 1410 + 4,2 t - 0,036 t^2 \quad (60)$$

În apa sărată, ea are valoarea:

$$a = 1410 + 4,2 t - 0,036 t^2 + 1,14 s \quad (61)$$

unde a este viteza sunetului în m/s;

- t — temperatura, în °C;
 s — salinitatea totală în ‰.

La presiuni mai mari, ea variază conform formulei (58), din cauza variației lui β (și accesoriu, γ).

Viteza de propagare a sunetului prin apă în stare de vapori este de același ordin de mărime ca prin aer, crescînd cu temperatura (401 m/s, la +130°C și circa 800 m/s la +1000°C).

3. Proprietățile termice. Căldura specifică. Definiția teoretică corespunde valorii

dQ/dt la +15°C. Definiția practică $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ între 0...100°C se deosebește de prima cu mai puțin de 1%. Diferența dintre căldurile specifice în stare lichidă la volum constant, respectiv la presiune constantă,

$$C_p - C_v = \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)_P - \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)_V = \frac{T}{A} \frac{v\alpha^2}{\beta} \quad (62)$$

unde $C_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)_P = \frac{\partial i}{\partial T}$ = căldura specifică la presiune constantă, în kcal/kg;

$C_v = \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)_V = \frac{\partial u}{\partial T}$ = căldura specifică la volum constant, în kcal/kg;

T — temperatura absolută, în °K;

A — echivalentul mecanic al caloriei, în m.kg/kcal;

v — volumul specific al apei, în m³/kg;

α — coeficientul de dilatare termică, în (°C)⁻¹;

β — coeficientul de compresibilitate, în m²/kg,

are valori mici la temperaturile joase, dar, cu creșterea temperaturii nu mai poate fi neglijată, fiind de ordinul 14% pentru $t = 100^\circ\text{C}$ (fig. 66).

La temperaturi mult inferioare celei critice, C_p variază puțin cu presiunea. La temperaturi apropiate de cea critică, C_p crește repede cu temperatura (v. fig. 67). La temperaturi superioare celei critice, C_p prezintă un maxim (în funcție de temperatură), cu atât mai atenuat cu cât presiunea este mai ridicată (v. fig. 68).

4. Proprietățile termodinamice. Se folosesc notațiile de la «proprietățile termice» și Q = cantitatea de căldură schimbată cu mediul de către sistem (1 kg apă), în kcal;

v — volumul specific în general, în m³/kg (V în cazul fazei vapori);

P — presiunea absolută, în kg/m²;

$u = Q - A \int P dv$ = variația energiei interioare a sistemului între limitele transformării sau, în cazul unei transformări în curs, între starea inițială standard (în lipsa altei precizări = 0°C și 760 mm col. Hg) și starea curentă;

$S = \int \frac{dQ}{T}$ = variația entropiei sistemului,
cu aceleași precizări de limite ca la u ;
 $H = u + Pv$ = căldură totală sau entalpia
sistemului, cu aceleași precizări de
limite ca la u și S .

Pentru valorile informative ale acestor
funcții (v. fig. 69, 70 și 71). Pentru valori
exacte, v. tabelele (de exemplu Hütte, Manu-
alul Inginerului, AGIR, pag. 556 și urm.).

Pentru detalii, a se vedea «Nomograme ter-
motehnice E.T., 1952». Pentru comparații cu
hidrocarburi, a se vedea fig. 130—136.

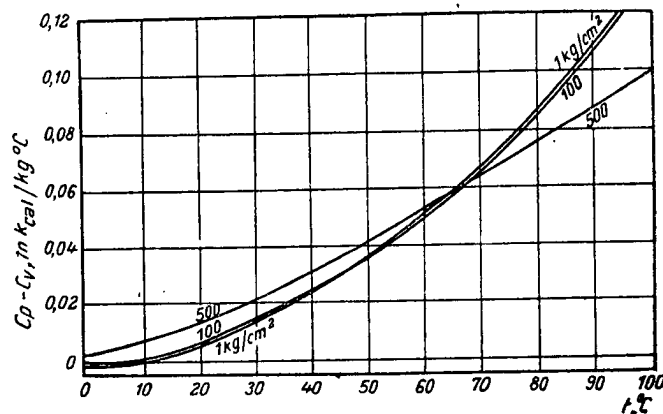


Fig. 66. Variația în funcție de temperatură, a diferenței $C_p - C_v$, la diferite temperaturi, pentru apa lichidă.

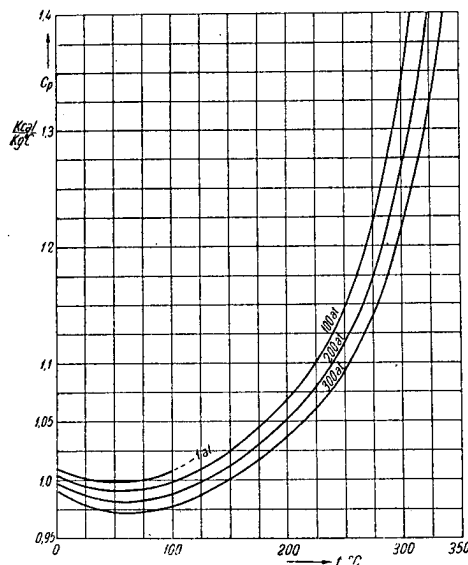


Fig. 67. Variația de temperatură, în domeniul temperaturilor subcritice, a căldurii specifice C_p a apei la diferite presiuni.

Pentru rezolvarea problemelor de transfor-
mări și de echilibru ale sistemelor alcătuite din
apă în stare lichidă și (sau) în stare de vapori
sint, în general, necesare și suficiente elemen-
tele caracteristice date de funcțiile: $F_1(T, S, P) = 0$; $F_2(H, S, P) = 0$ și $F_3(H, P \text{ sau } T) = 0$.

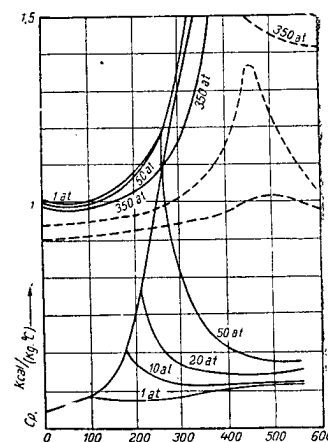


Fig. 68. Variația în funcție de tempera-
tură, în domeniul temperaturilor super-
critice, a căldurii specifice C_p a apei.

5. Conductibilitatea termică a apei, inter-
venind îndeosebi în problemele de recuperare
secundară prin metode termice, este puțin
cunoscută. În starea lichidă continuă, apa
propagă căldura atât prin radiație, cât și prin
convecție și prin conductibilitate propriu
zisă. În stare de distribuție într-un mediu

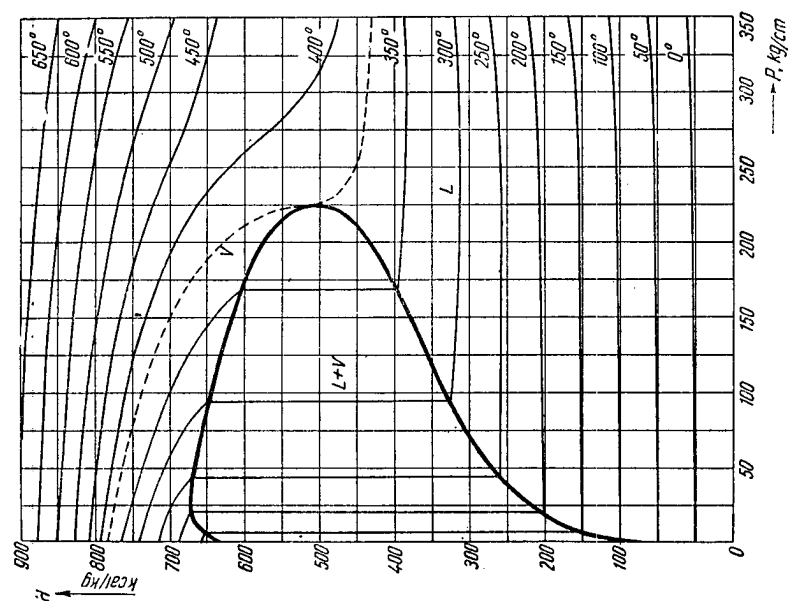


Fig. 71. Diagrama (H, P, T) pentru apa lichidă și pentru vapori între 0 și 350 kg/cm² și 0 și 650°C.

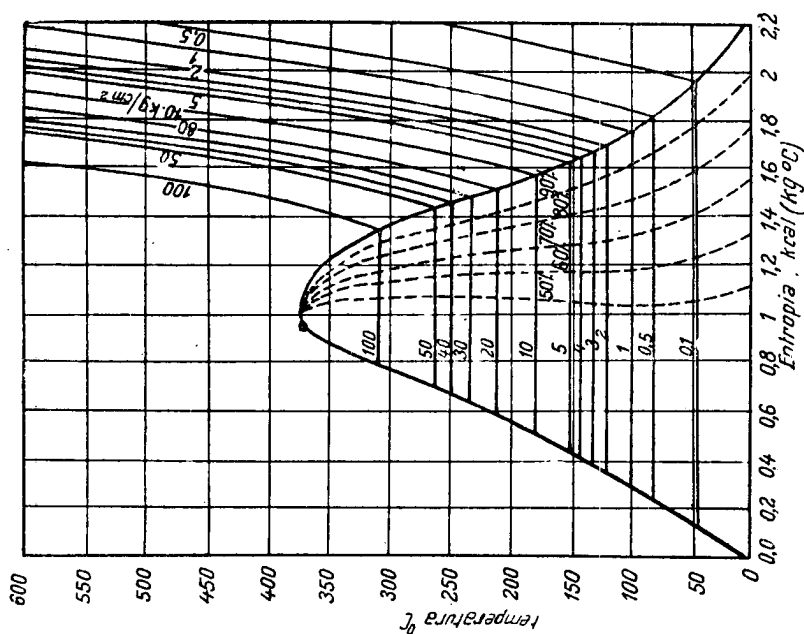


Fig. 69. Diagrama (T, S) pentru apă între 0 și 600°C și 0 și 100 kg/cm².

poros ea transmite căldura, practic, numai prin conductibilitate pură. Chiar în acest caz conductibilitatea termică a mediului poros saturat cu apă, și, eventual, cu alte fluide nu este aceea a apei, ci media conductibilităților mediului poros, a apei și a celorlalte fluide saturante, ponderată cu volumul respectiv, adică:

$$\alpha_{m1} = (1 - m) \alpha_p + \Sigma m S_1 \alpha_i \quad (63)$$

unde:

- α_{m1} este conductibilitatea mediului în stare de saturatie, în kcal/m (°) h;
- α_p — conductibilitatea proprie a materialului solid care constituie mediul poros în kcal/m (°) h;
- α_i — conductibilitatea fluidului saturant i , (apă, țiței, gaze), în kcal/m (°) h;
- m — porozitatea mediului.

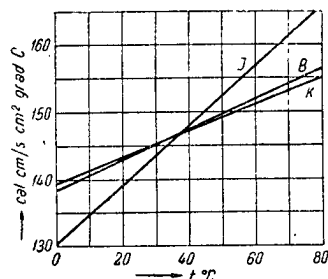


Fig. 72. Conductibilitatea termică proprie zisă a apei, la diferite temperaturi: J — după Jakob; β — după Bridgman; K — după Keyes.

În cazul mediilor poroase saturate cu amestecuri complexe de hidrocarburi, relația (63) nu poate fi direct aplicată decât pentru diferențe foarte mici de temperatură, din cauza absorbției (respectiv degajării) de căldură

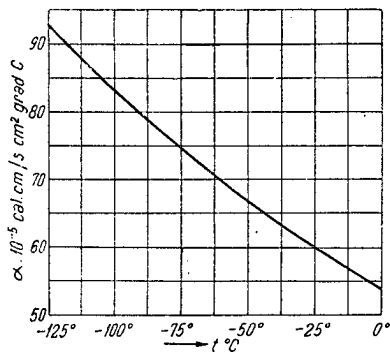


Fig. 73. Conductibilitatea termică a apei în stare solidă, forma alotropică I, în funcție de temperatură.

latentă de schimbare de stare de agregare a acestora.

În fig. 72 sînt redată curbele de variație a lui α_{apd} în funcție de temperatură, la presiunea atmosferică, după diferiți cercetători.

În calculele de regim termic al conductelor intervin coeficienții de conductibilitate termică

ai apei în stare solidă. Pentru zăpada afînată se poate lua $\alpha = 0,03 - 0,04$ kcal/m (°) h. Pentru zăpada mai mult sau mai puțin tasată, care a suferit înghețări și dezghețări succesive, coeficientul este mai mare, atîngînd, la limită, valorile gheței (v. fig. 73).

6. Proprietățile moleculare. a) Viscositatea (definiții și măsurători) apei în stare lichidă

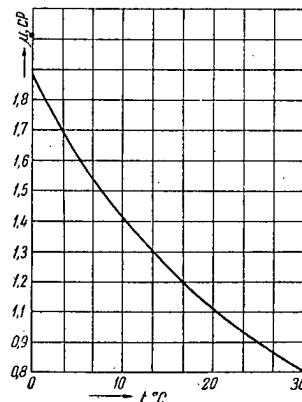


Fig. 74. Variația viscozității apei în stare lichidă, la presiunea atmosferică, în funcție de temperatură, în gama 0 la + 30°C.

fără materiale coloidale în suspensie este, practic, independentă de gradientii *) de viteză la care se produce frecarea internă. Ea depinde numai de temperatură, de presiune și de conținutul în corpuri străine dizolvate. (Asupra

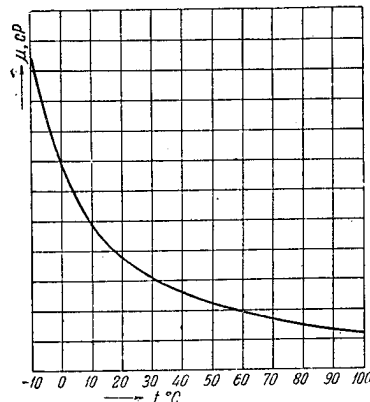


Fig. 75. Variația viscozității apei în stare lichidă, la presiunea atmosferică, în funcție de temperatură, în gama -10 până la + 100°C.

influenței corpurilor solide în suspensie, v. «Noroii de săpare», vol. I).

Spre deosebire de alte lichide, tot cu viscozitate relativ mică, apa prezintă variație pronunțată a viscozității cu temperatura în gama 0...20°C (v. fig. 74, 75 și 76).

*) denumirea prin analogie, făcînd abstracție de caracterul vectorial al vitezei.

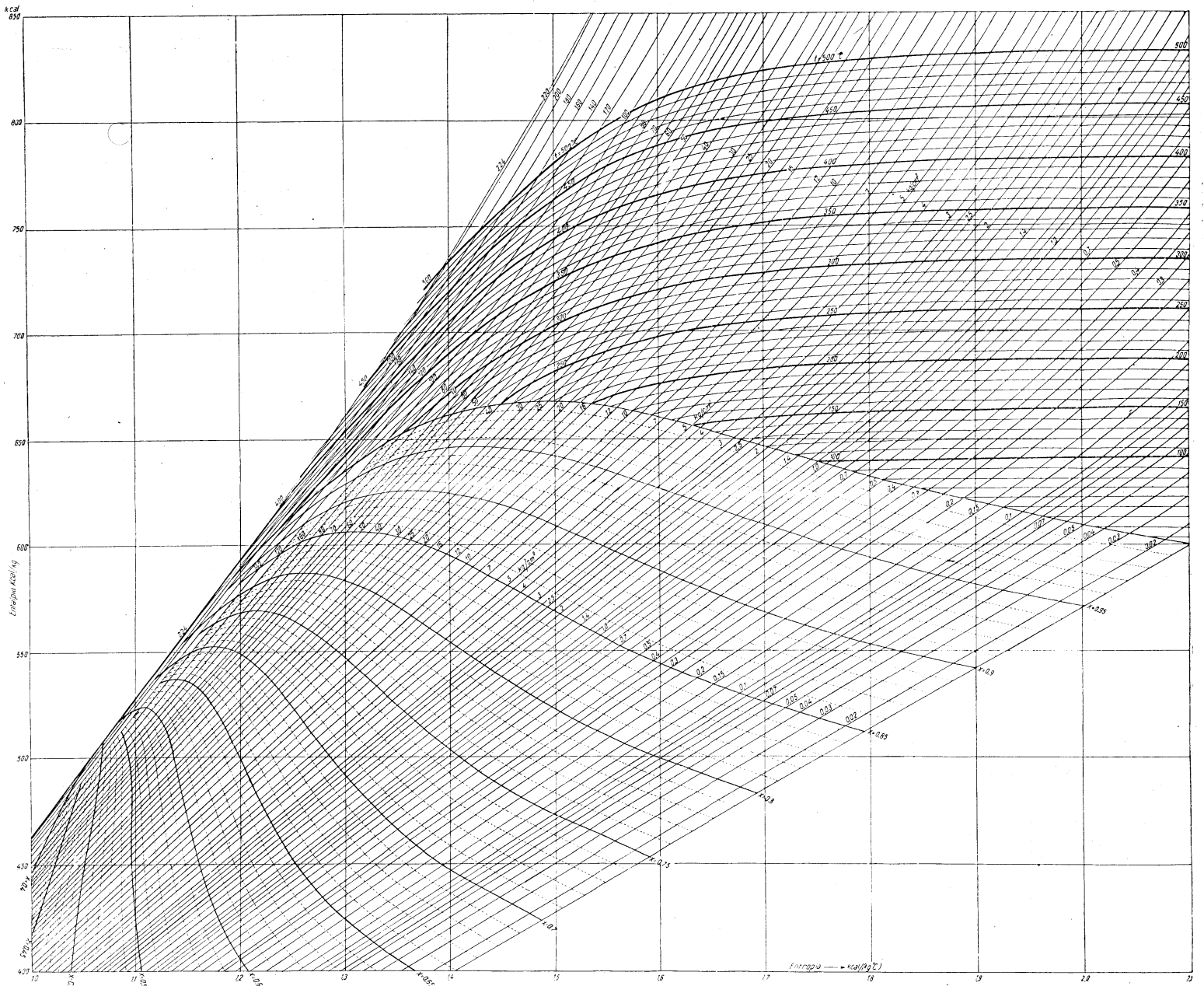


Fig. 70. Diagrama (H, S) pentru vaporii de apă între 400 și 850 kcal/kg, 0,02 și 224 kg/cm², respectiv 10 și 500 °C.

Variația viscozității cu presiunea este relativ redusă. Ea prezintă la temperaturile joase un minim la circa 1 000 kg/cm². În condițiile de zăcămint se poate considera practic că viscozitatea apei crește încet și regulat cu presiunea, la temperatură constantă (v. fig. 77).

Valoarea-referență a viscozității apei distilate este $\mu = 1,008 \pm 0,002$ cP, la + 20°C.

Viscozitatea vaporilor de apă intervenind în problemele de transport al aburilor este dată în fig. 78 și 79.

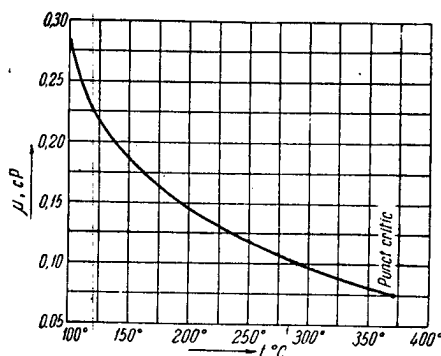


Fig. 76. Variația viscozității apei în stare lichidă, la presiunea de echilibru cu vaporii ei, în funcție de temperatură, în gama + 100 la + 374°C.

Referitor la viscozitatea apei încărcate cu săruri în soluție, v. Cap. IV B.b.2.

b) Tensiunea superficială a apei este foarte mult influențată de prezența în soluție a sub-

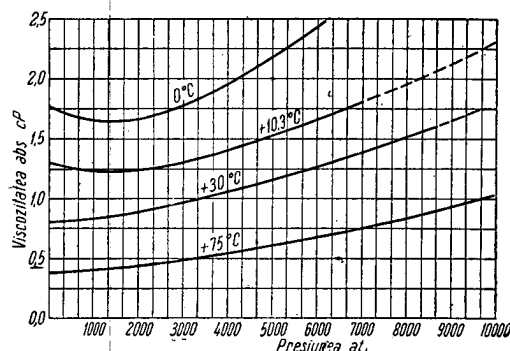


Fig. 77. Variația viscozității apei în stare lichidă, la diferite temperaturi, în funcție de presiune.

stanțelor cu moleculă heteropolară. De exemplu, apa distilată în stare de extremă puritate prezintă o tensiune superficială $\sigma = 72,75$ dyn/cm, la + 20°C *), pe când apa de conductă potabilă prezintă $\sigma = 35-40$ dyn/cm. Unii alcooli (izobutlic, izoamilic etc), eterul etilic etc, chiar numai ca urme, reduc tensiunea superficială a apei până la de 50-100 ori.

*) v. tabela 10.

Tensiunea superficială a apei poate fi exprimată prin:

$$\sigma = 75,64 - 0,1467 t, \quad (64)$$

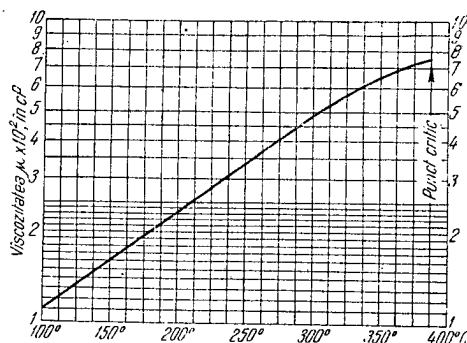


Fig. 78. Viscositatea dinamică a apei în stare de vapori saturați în funcție de temperatură și de presiune.

între 0°... + 30°C cu o eroare mai mică decât 0,1%, sau prin

$$\sigma = 76,03 - 0,1698 t. \quad (65)$$

între - 10°... + 120°C, cu o eroare mai mică decât 0,5%, sau prin:

$$\sigma = 0,2035 (374 - t) \quad (66)$$

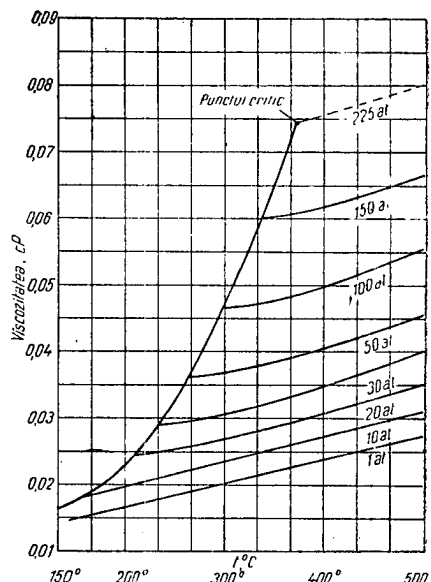


Fig. 79. Viscositatea dinamică a apei în stare de vapori saturați și supraîncălziți.

între + 120°C și punctul critic, cu o eroare care, accidental atinge 5% în apropierea punctului critic, variația lui σ fiind în realitate neliniară în această regiune, din cauza fenomenelor de suprasaturație, v. și fig. 80.

Pentru tensiuni interfaciale apă-țitei, v. IV B.b.2., fig. 145 și 146.

7. Proprietățile optice. a) *Indicele de refracție*, definit, $n = v_{\text{vid}}/v_{\text{mediu}}$, unde v_{vid} este viteza

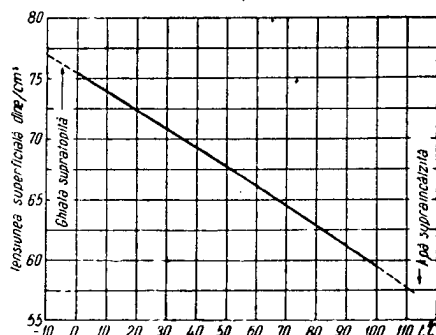


Fig. 80. Variația tensiunii superficiale a apei în funcție de temperatură.

de propagare a luminii în vid iar v_{mediu} este viteza de propagare a luminii în mediul considerat, variabil cu temperatura și cu lungimea de undă a radiației respective, este pentru apă, la $+18^\circ\text{C}$.

$$n^2 = -0,01314 \lambda^2 + 1,76148 + \frac{0,0065438}{\lambda^2 - (0,11512)^2} \quad (67)$$

unde n este indicele de refracție al apei,

λ — lungimea de undă a radiației cercetate, în μ , relație al cărei avantaj îl constituie posibilitatea de a obține, prin derivare față de λ , dispersiunea.

Pentru apa pură între $+10^\circ \dots +60^\circ\text{C}$, n are, pentru diferite valori ale lui λ , valorile date în tabela 11 (v. și fig. 82 și 83).

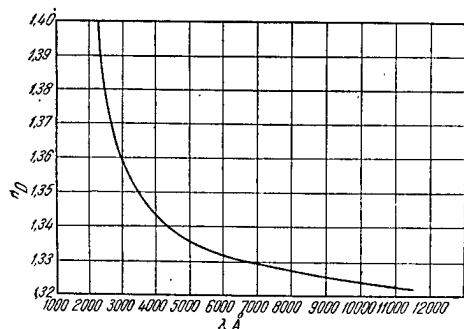


Fig. 81. Variația indicelui de refracție al apei lichide, la 20°C și la presiunea atmosferică, în funcție de lungimea de undă a razei refractate.

Pentru apa pură la $+25^\circ\text{C}$ și pentru diferite radiații n are valorile date în tabela 13 (v. și fig. 81).

Indicele de refracție al apei lichide crește relativ puțin cu presiunea, iar coeficientul de variație $\partial n_D / \partial P$ variază cu temperatura conform tabelii 13.

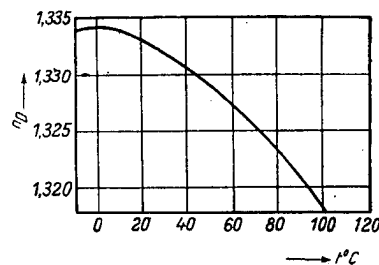


Fig. 82. Variația în funcție de temperatură, a indicelui de refracție al apei lichide, pentru radiația de $\lambda = 5893 \text{ Å}$, la presiunea atmosferică.

Indicele de refracție al apei solide, folosit uneori pentru identificarea crio-hidraților (v. Cap. IV B.b.2.b), are, din cauza anizotropiei gheții, valorile date în fig. 84.

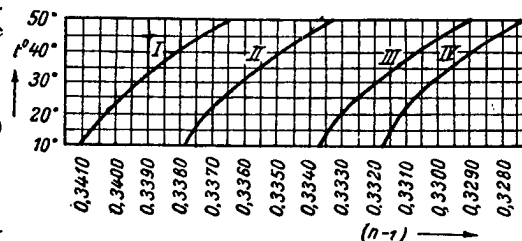


Fig. 83. Variația în funcție de temperatură, a indicilor de refracție ai apei lichide pentru diferite radiații, la presiunea atmosferică: I—pentru radiația H_γ a hidrogenului $\lambda = 4341 \text{ Å}$; II—pentru radiația H_β a hidrogenului $\lambda = 4871 \text{ Å}$; III—pentru radiația H_D a sodiului $\lambda = 5893 \text{ Å}$; IV—pentru radiația $H_\alpha = 6563 \text{ Å}$.

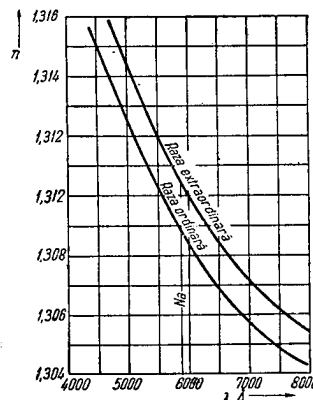


Fig. 84. Variația în funcție de lungimea de undă a razei refractate, a indicilor de refracție ai apei solide, starea alotropică I (v. fig. 49), cristalizând în sistemul romboedric cu suprafața indicatoare optică caracteristică cristalelor uniaxe, la 0°C și la presiunea atmosferică.

Tabela 10. Tensiuni superficiale ale apei σ în dyn/cm

Unități Zeci	Temperaturi în °C									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	75,626	75,470	75,312	75,155	75,006	74,860	74,713	74,555	74,410	74,263
10	74,113	73,957	73,800	73,653	73,497	73,350	73,203	73,045	72,889	72,732
20	72,583	72,427	72,270	72,113	71,957	71,810	71,652	71,495	71,339	71,192
30	71,035	70,869	70,710	70,559	70,397	70,230	70,073	69,906	69,740	69,573
40	69,416	69,249	69,083	68,925	68,759	68,592	68,424	68,257	68,091	67,914
50	67,799	67,571	67,405	67,238	67,072	66,894	66,717	66,541	66,374	66,208
60	66,040	65,864	65,688	65,521	65,344	65,167	64,992	64,805	64,628	64,453
70	64,274	64,099	63,922	63,746	63,570	63,393	63,217	63,038	62,863	62,676
80	62,500	62,313	62,137	61,950	61,773	61,587	61,410	61,224	61,047	60,861
90	60,684	60,507	60,321	60,136	59,949	59,763	59,576	59,380	59,184	58,987
100	58,802									

Tabela 11. Indicii de refracție ai apei față de aer, la diferite temperaturi, pentru diferite radiații monocromatice

Temperatura °C	Radiația $\lambda = \dots \text{Å}$			
	4341 Å (G sau hidrogen γ)	4861 Å (F sau hidrogen β)	5893 Å (D sau Na medie)	6563 Å (C sau hidrogen α)
10°	1,3411	1,3378	1,3337	1,3318
20°	1,3404	1,3371	1,3330	1,3312
30°	1,3392	1,3360	1,3320	1,3302
40°	1,3379	1,3347	1,3306	1,3288
50°	1,3364	1,3332	1,3280	1,3274
60°	1,3346	1,3315	1,3272	1,3257

comparația între apa cercetată și soluția-etalon nu mai este efectuată cu ochiul, ci cu o celulă fotoelectrică înzestrată cu filtre și cu dispozitive de amplificare corespunzătoare. În lipsa unei astfel de instalații, precizia determinărilor cu ochiul liber poate fi sporită mult prin folosirea de filtre colorate și cu diafragme cu deschidere variabilă (fotometrul Pulfrich). La aceste determinări, nu este necesar să se folosească filtre monocromatice, deoarece filtrele cu gelatină colorată cu coloranți obișnuiți sînt satisfăcătoare.

Colorimetria aplicată la examinarea apelor care urmează să fie injectate în zăcămint nefind

Tabela 12. Indici de refracție ai apei pure, la 25° C și presiunea atmosferică în funcție de lungimea de undă λ , în Å

$\lambda = \text{Å}$, în aer	n_{25}	λ , în aer	λ , în aer	n_{25}	λ , în aer	n_{25}	n_{25}
7 065,19	1,329 544	5 875,61	1,332 555	5 015,67	1,335 859	4 471,47	1,338 924
6 678,14	1,330 397	5 769,60	1,332 894	4 861,33	1,336 627	4 358,34	1,339 709
6 562,8	1,330 671	5 460,74	1,333 977	4 713,14	1,337 434	4 046,56	1,342 238
5 863	1,332 502						

Tabela 13. Variația în funcție de temperatură a coeficientului de variație a indicelui de refracție față de raza galbenă a sodiului, medie $\lambda = 5 893 \text{ Å}$, la schimbarea presiunii

t°, C	$\frac{\Delta n_D}{\Delta P} \cdot 10^4$	t°	$\frac{\Delta n_D}{\Delta P} \cdot 10^4$
0°	0,1685	45°	0,1428
5°	0,1625	50°	0,1417
10°	0,1580	55°	0,1406
20°	0,1514	60°	0,1396
25°	0,1489	70°	0,1376
30°	0,1470	80°	0,1350
35°	0,1454	90°	0,1340
40°	0,1439	100°	0,1332

b) Culoarea (pentru definiție și pentru clasificarea de principiu v. Hütte-AGIR, pag. 285), care constituie o indicație sumară dar prețioasă pentru originea și pentru puritatea apei care urmează să fie injectată în zăcămint, se determină cu un colorimetru optic (Stammer, Dubosq), v. Hütte-AGIR, fig. 294, sau, pentru determinări de precizie, cu comparatorul fotoelectric analog celor citate, la care, însă,

o determinare absolută a unei mărimi unice, ci numai o determinare expeditivă a unui complex de parametri naturali, ea urmează să fie etalonată practic pentru fiecare sursă de apă, în funcție și de anotimp și de factorii climatici.

Apa chiar pură prezintă o absorbție sensibilă a luminii, selectivă, absorbind de preferință radiațiile cu lungime mare de undă (colorație albastră, în strate groase de 100–200 m). Apele naturale prezintă aceeași caracteristică, dominantă sau nu, după cum intervin sau nu efectele de absorbție selectivă a substanțelor străine. (Apa de mare absoarbe practic, total, radiațiile roșii, după 60–80 m parcurs, și pe cele albastre, după 100–200 m). Apele de uscat stătătoare prezintă o gamă mai largă de absorbție selectivă, absorb radiațiile albastre, verzui, brune, etc), decît cele curgătoare, care, însă, prezintă în general o absorbție neselectivă mai importantă, din cauza materialului solid în suspensie (v. B.a.7.c).

Pentru culorile din gama albastru-verde se folosesc amestecuri de soluție-etalon albastră

și galbenă, redînd scara de nuanțe a lui Forel din tabela 14.

Tabela 14. Scara de nuanțe albastru-verde pentru determinarea prin comparație a culorilor apelor naturale

Nr. nuanței	Soluție galbenă	Soluție albastră	Nr. nuanței	Soluție galbenă	Soluție albastră
1	0	100	7	27	73
2	2	98	8	35	65
3	5	95	9	44	56
4	9	91	10	54	46
5	14	86	11	65	35
6	20	80			

Pentru comparația apelor naturale cu cantități importante de compuși organici (produse de turbificare etc.), este necesar să se recurgă la amestecul cu o a treia soluție-etalon preparabilă conform tablei 15.

Tabela 15. Scara de nuanțe verzui-brune pentru determinarea prin comparație a culorilor apelor naturale

Nr. nuanței	Soluție galbenă	Soluție albastră	Soluție brună
11	65	35	0
12	60	35	5
13	55	35	10
14	50	35	15
15	45	35	20
16	40	35	25
17	35	35	30
18	30	35	35
19	25	35	40
20	20	35	45
21	15	35	50

Soluție galbenă: cromat neutru de potasiu 0,5% în apă distilată.

Soluția albastră:

Sulfat cupric p. a. 1 g
 $\text{NH}_4(\text{OH})$ conc. cca 5 cm^3
 H_2O distilată cca 194 cm^3

Total 200

Soluția brună: sulfat de cobalt 0,5% în apă distilată.

c) *Opacitatea*. Absorbția provocată de suspensiozii de dimensiuni mari (peste 1 μ) este, practic, neselectivă (cu o ușoară preferință pentru radiațiile cu lungime de undă mică).

Determinarea puterii de absorbție prin turbidimetrie constituie o probă rapidă care, în paralel cu determinarea exactă a materialului solid în suspensie prin filtrarea unei anumite cantități de apă și prin cîntărirea filtrului uscat, permite determinarea rapidă a cantității de material în suspensie din apa de injectat.

Deși constanta de absorbție a unei suspensii de material solid în apă depinde, în afară de conținutul fracțional de material solid, și de alți parametri (starea de diviziune, puterea reflectatoare, indicele de refracție al materialului solid etc), ea dă informații mai prețioase, uneori tocmai din această cauză. Ca și proba colorimetrică, însă ea trebuie «etalonată» regional, prin analize exacte de material solid în suspensie.

Determinarea practică a opacității nu se face prin măsurarea absorbției, ci prin determinarea grosimii stratului de apă, care face imposibilă distincția prin transparență a unor repere anumite în condiții de lumină-standard.

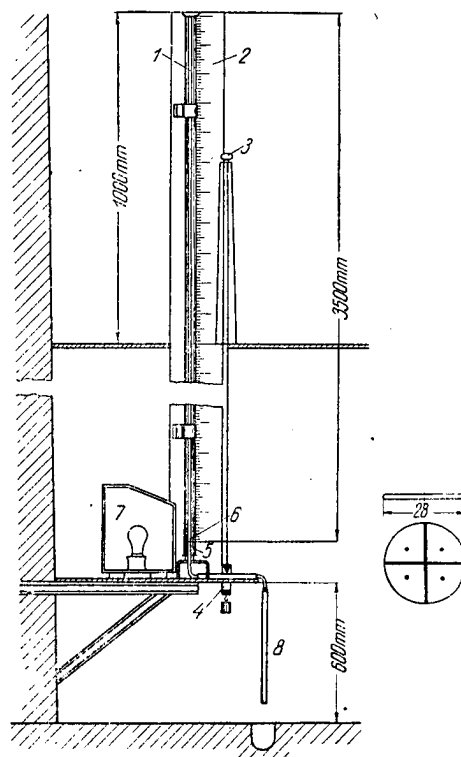


Fig. 85. Instalația pentru determinarea turbidității prin metoda «cu cruce». 1 — tub de sticlă cu diametrul de 300 mm și cu lungimea de 3500 mm; 2 — miră divizată în cm, solidară cu tubul 1; 3 — scripete pentru firul de comandă pentru pînă de evacuare; 4 — pînă de evacuare (bridă cu greutate, turtind tubul de cauciuc); 5 — dop de cauciuc perforat; 6 — disc de porțelan cu repere (cruce și puncte); 7 — caseta pentru lampă de 300 W; 8 — tub de descărcare.

Proba industrială «de citire» după OST 3351-46, adaptată mai mult altor scopuri industriale, determină grosimea stratului de apă prin care se mai poate citi distinct un text scris (cu dimensiuni și cu caractere asemănătoare celor de ziar, corp 8). Limita de 30 cm prevăzută corespunde desorii unor ape incompatibile cu injectarea în rocile cu compoziție granulometrică fină și cu permeabilitatea redusă (8—10 mg/l). De aceea în U.R.S.S. se folosește metoda «cu cruce», la care grosimea stratului de apă cercetată poate atinge 3,5 m, iar figura examinată se pretează mai bine la detecția limitei de vizibilitate: o cruce cu brațele cu grosimea de 1 mm dispăre mai târziu decît patru puncte cu diametrul de 1 mm, situate între brațele ei (fig. 85).

Pentru determinarea conținutului fracțional de material solid în suspensie, se folosesc curbe de etalonare experimentală, diferite după natura apei și a suspensoizilor, care au forma curbei din fig. 86.

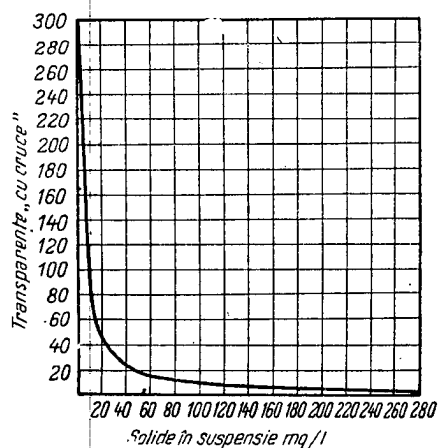


Fig. 86. Curbă de etalonare a dispozitivului de măsură a transparenței prin metoda «cu cruce», pentru un caz particular. În abscisă, conținutul de corpuri solide în suspensie, mg/l. În ordonată, transparența prin metoda «cu cruce», grosimea în cm a stratului de apă care asigură la limită vizibilitatea.

8. Proprietățile electrice și proprietățile magnetice. a) Permitivitatea sau permeabilitatea dielectrică (a se evita numirea de constantă dielectrică) definită curent ca la Cap. III.B.b.9.b), sau, mai general, ca valoarea ϵ care satisface ecuația:

$$F = \frac{1}{\epsilon} \frac{qq'}{r^2} \quad (68)$$

în care:

F este forța de atracție electrostatică care se naște între sarcinile punctuale q și q' , în din e ;
 q, q' — sarcinile electrice care se atrag în unități electrostatice C.G.S.;
 r — distanța dintre sarcinile punctuale, în cm,

este în cazul apei distilate, funcție de temperatură, de presiune și de frecvență. Pentru eliminarea efectului frecvenței, se ia ca frecvență de referință o frecvență suficient de joasă pentru ca efectul acesteia să fie neglijabil, de exemplu frecvența zero (curent continuu). Până la $f \approx 80$ megacicli/s, ea variază puțin; deasupra acesteia ea scade (v. fig. 87).

Pentru frecvențe mici, valoarea ei de referință variază aproape liniar, scăzând cu temperatura (v. fig. 88), aproximativ conform legii

$$\epsilon = 80 - 0,4(t - 20^\circ) \quad (69)$$

în care:

t este temperatura, în $^\circ\text{C}$ ($0^\circ < t < 100^\circ\text{C}$).

În funcție de presiune, ea variază încet și liniar, aproximativ conform legii

$$\epsilon = 81,5 + 0,0046 p \quad (70)$$

în care:

p este presiunea în kg/cm^2 ;

ϵ — permitivitatea, la $+16^\circ\text{C}$, valabilă între 1–200 kg/cm^2 , pentru frecvența de referință $f=6$ megacicli/s.

Permitivitatea apei este folosită la determinarea continuă și automată a conținutului în impurități al țiteiului, pe cale electrică. Pentru permitivitatea apei mineralizate, v. Cap. III B.1.9.b și B Cap. IV B.a.8.a, însă dacă țiteiul conține apă cu salinitate sensibilă este de preferat să se etaloneze direct aparatura prin analize chimice efectuate în paralel, deoarece, în aceste condiții, datele teoretice disponibile asupra permitivității sînt nesatisfăcătoare.

b) Susceptibilitatea (χ) și permeabilitatea (μ) magnetică legate prin relația:

$$\mu = 1 + 4\pi\chi, \quad (71)$$

exprimate de obicei în valori relative, față de acelea ale vidului ($\mu_{\text{vid}} = 1$, $\chi_{\text{vid}} = 0$), sînt determinate prin:

$\chi_{20^\circ, 1 \text{ at}} = -0,7186 \cdot 10^{-6}$, cu o eroare relativă de $\pm 10^{-4}$ și

$$\chi_t = \chi_{20^\circ} [1 + 0,000131(t^\circ - 20^\circ)], \quad (72)$$

ceea ce arată că, în condițiile obișnuite, apa este slab diamagnetică. În cazul prezenței în soluție a unor corpi para-sau feromagnetici, ea poate fi și paramagnetică și, în particular, neutră.

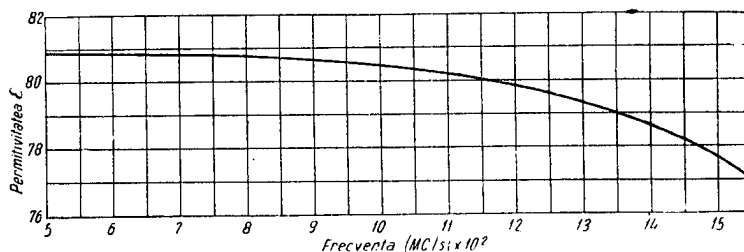


Fig. 87. Variația permitivității apei distilate, la 17°C și la presiunea atmosferică, în funcție de frecvență pentru gama de frecvențe.

c) Conductivitatea (c), respectiv rezistivitatea (p) (definite ca la Cap. III.B.b.9.a) apei

distilate sînt funcții de temperatură și de presiune (ultima puțin cunoscută).

$$c = \frac{1}{\rho}$$

$$[\rho] = [\text{ohm} \cdot \text{m}] \text{ sau } [\rho'] = [\text{ohm} \cdot \text{cm}]$$

și

$$[c] = [\text{ohm}^{-1} \text{ m}^{-1}] \text{ sau } [c'] = [\text{ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}]$$

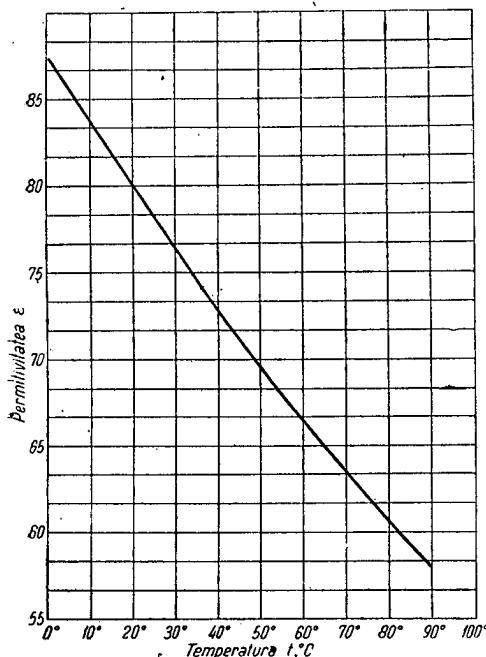


Fig. 88. Variația permittivității apei distilate la frecvență joasă și la presiune atmosferică, în funcție de temperatură.

Observație. Deseori se notează $\text{mho} = \frac{1}{\text{ohm}}$, astfel încît în practica industrială

$$\text{se dă frecvent } [c] = \left[\frac{\text{mho}}{\text{m}} \right] *).$$

Pentru apa distilată în stare de puritate maximă realizabilă, $c = 4,2 \cdot 10^{-8} \text{ mho/cm}$; pentru apa distilată în stare de puritate maximă conservabilă, $c \approx 7 \cdot 10^{-7} \text{ mho/cm}$; pentru apa îngrijit distilată, obișnuită, conservată în vase de sticlă de laborator, $c = (1,4 \dots 10) \cdot 10^{-6} \text{ mho/cm}$. Apa dulce de râu are, după gradul și după natura mineralizării $c = (100 \dots 700) \cdot 10^{-6} \text{ mho/cm}$. Pentru apa mineralizată, v. Cap. IV B.b.6.

d) Concentrația în ioni de hidrogen, pH. Conductibilitatea electrică a apei, deși foarte

*) A se evita greșeala foarte frecventă de a se exprima ρ în ohm/cm , ohm/cm^2 sau ohm/cm^3 , respectiv ohm/m , ohm/m^2 , sau ohm/m^3 datorită exclusiv necunoașterii dimensiunilor mărimii respective.

mică, nu este nulă și se datorește unei disociații $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$, care are loc, la echilibru, după legea acțiunii maselor

$$\frac{[\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]} = k \quad (73)$$

în care parantezele simbolizează convențional concentrația electrolitului respectiv în ioni cuprinși în paranteză, exprimată teoretic în molecule, respectiv ioni la litru, practic în multipli molecule-gram, respectiv ioni-gram sau echivalenți-gram la litru. Mărimea k , numită «constanta de disociere» a corpului studiat (respectiv apei), nu este o constantă decât numai în ce privește comportarea față de variația concentrațiilor. Ea este o funcție de temperatură și de presiune.

Pentru apă la presiunea atmosferică, k are valoarea dată în tabela 16.

Tabela 16. Variația coeficientului de disociere al apei la presiunea atmosferică, în funcție de temperatură

$t^\circ\text{C}$	0°	10°	18°	21,4°	25°	50°	100°	150°*)	200°*)
$k \cdot 10^{14}$	0,116	0,281	0,590	1,00	1,04	5,66	58,2	234	525

*) La presiune egală cu tensiunea de vapori

Considerînd temperatura mediului ambiant $t^\circ = 21,4^\circ\text{C}$ la care $k = 10^{-14}$, și ținînd seama că $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-]$ la apă neutră, rezultă că

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7}.$$

Prin adăugarea unui acid disociază, concentrația soluției în ioni H^+ , $[\text{H}^+]$ crește și, pentru a satisface ecuația (73), $[\text{OH}^-]$ scade, astfel încît concentrația soluției în ioni de hidrogen este o măsură a acidității, respectiv a alcalinității ei. Din cauza dificultății folosirii ei, concentrației $[\text{H}^+]$ i se substituie mărimea pH, care este logaritmul zecimal al inversului concentrației în ioni de hidrogen:

$$\text{pH} = \log_{10} \frac{1}{[\text{H}^+]} \quad (74)$$

Deoarece k variază cu t° , parametrul pH al apei neutre variază cu temperatura (v. fig. 89).

Parametrul pH permite, ca și $[\text{H}^+]$, urmărirea proprietăților de reacție, de corozivitate, de conductibilitate electrică, crioscopice etc., însă prezintă avantajul de a putea fi măsurat direct, pe cale electrică.

Considerînd hidrogenul ca metal și aplicînd legea lui Nernst pentru a obține diferența de potențial electric dintre doi electrozi constituiți din același metal, cufundați în două compartimente separate printr-o membrană semipermeabilă, într-un electrolit, care în unul dintre compartimente are o concentrație unitară în cationul respectiv, iar în

celălalt, o concentrație oarecare, de exemplu $[H^+]$, se obține

$$V = -\frac{RT}{nF} \ln \frac{p}{P} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{1}{[H^+]}, \quad (75)$$

unde;

V — este diferența de potențial dintre electrozi, în volți

R — constanta gazelor perfecte — $P_0 V_0 / 273$;

P_0 — $76 \text{ cm} \cdot 13,6 \text{ g/cm}^3 \cdot 981 \text{ cm/s}^2$;

V_0 — $22\,400 \text{ cm}^3/\text{g}$;

F — $96\,540 \text{ coulombi} = 9\,654 \text{ U.E.M.C.G.S.}$

n — valența materialului, 1 pentru hidrogen;

și:

$$V = A \ln \frac{1}{[H^+]} = B \cdot \text{pH} \quad (76)$$

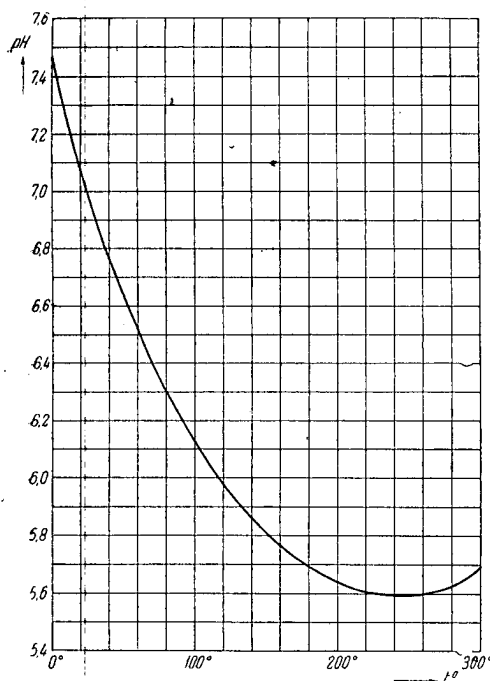


Fig. 89. Variația indicelui pH al apei neutre, în funcție de temperatură, la presiune atmosferică.

care arată că determinarea indicelui pH se poate reduce la o simplă măsurare directă de diferență de potențial.

Pentru cationii monovalenți, $B = 59 \cdot 10^{-3} V$, iar variația lui B cu temperatura este de circa $\frac{\partial B}{\partial t} \approx 2 \cdot 10^{-4} V/^\circ C$.

În practică, realizarea condițiilor teoretice de măsurare este foarte mult îngreuiată de fenomene secundare (difuziune, polarizare etc.) cum și de viteza redusă cu care se poate realiza

în jurul electrodului platinat saturația unitară în hidrogen. Tehnica măsurării indicelui pH (ionometria) folosește, după precizia și după viteza urmărită, o serie de metode și de artificii (lanțuri de electrozi, electrodul de H în Pt platinată, electrodul de calomel, electrodul de sticlă, electrodul cu chinhidronă etc.).

În industria petrolului se folosesc:

1) Determinări colorimetrice, la care soluției de cercetat i se adaugă un colo-

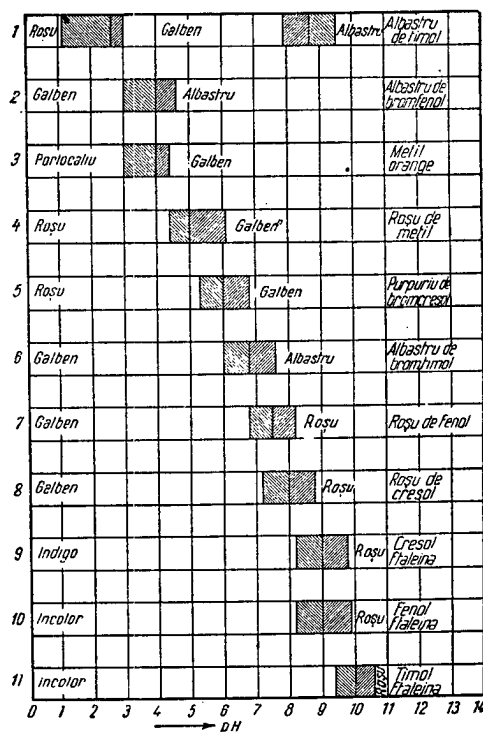


Fig. 90. Scara coloranților indicatori mai frecvent folosiți pentru determinarea colorimetrică a indicelui pH, cu intervalele de viraj și cu culorile respective: 1 — albastru de timol; 2 — albastru de brom fenol; * — metilorange; 4 — roșu de metil; 5 — roșu (purpuru) de brom cresol; 6 — albastru de bromtimol; 7 — roșu de fenol; 8 — roșu de cresol; 9 — cresol-ftaleină; 10 — fenol-ftaleină; 11 — timol-ftaleină.

rant-indicator, care prezintă într-o gamă relativ restrinsă de variație a indicelui pH, o variație de culoare destul de bruscă. Pentru determinări mai exacte, culoarea rezultată este comparată cu cea dată de același indicator într-o soluție de pH cunoscut (practic se folosesc o serie de fiole închise, îngrijit realizate). O variantă constă în cufundarea în soluția de cercetat a unei foite de gelatină, imbibată în prealabil cu indicator și în compararea ei cu o serie de foite analoge, tratate cu soluții de pH cunoscut sau impregnate cu coloranți stabili aleși în mod adecvat (v. fig. 90).

Deși această metodă este expeditivă și nu necesită o calificare specială pentru a o aplica,

ea are o valoare puțin importantă din cauza preciziei reduse a rezultatelor obținute, datorită subiectivității comparației culorii, aprecierii culorii la momentul potrivit, după stabilirea echilibrului de colorație (viraj). Eroarea curentă este de 0,1–0,2 unități pH.

Într-o altă variantă a acestei metode se folosesc benzi de hirtie de filtru, impregnate pe porțiunea centrală cu colorantul-indicator respectiv și colorate cu câteva benzi de nuanțe diferite (coloranți stabili) corespunzătoare diferitelor trepte de pH din virajul indicatorului respectiv, de o parte și de alta a porțiunii impregnate cu indicator. Deoarece este mult mai ieftină și mai expeditivă și nu necesită transportul unei aparaturii fragile, această metodă este de un real folos, de aceea ea a intrat în uz curent la studiul noroaielor de de foraj, mai puțin la studiul apelor de zăcămint sau de injecție. Ca toate metodele colorimetrice, ea prezintă dezavantajul unor determinări foarte problematice în cazul soluțiilor colorate.

2) Determinările electrometrice, care folosesc ionometria (potențio-metre de comparație cu sursă de curent separată și cu dispozitive de corecție) și serii de electrozi aleși în mod corespunzător condițiilor de lucru, permit unui operator experimentat să obțină rezultate cu o eroare de 0,01–0,02 unități pH. Ele sînt folosite din ce în ce mai mult la studiul apelor de zăcămint și de injec-tare. Obținerea efectivă a acestei precizii se lovește, însă, de dificultăți mari în lucrările de șantier: «intoxicarea» electrozilor, fenomenele de supratensiune de hidrogen, corecții de temperatură, fragilitatea aparaturii etc, astfel încît rezultatele obținute prin această metodă în lucrări de șantier, trebuie, în general, verificate și utilizate ca atare numai în măsura reproductibilității lor.

b. Apa mineralizată *)

1. Greutatea specifică a soluțiilor de NaCl la + 20° este redată în tabela 17.

Tabela 17. Greutatea specifică a soluțiilor de NaCl la + 20° (numeric, cu densitatea d_4^{20})

Na Cl/apă, %	Construcția, g/l	d_4^{20}	$-\frac{\partial d}{\partial t}$
1	10,053	1,0053	0,00022
2	20,250	1,0125	0,00024
4	41,072	1,0268	0,00028
6	62,478	1,0413	0,00031
8	84,472	1,0559	0,00034
10	107,070	1,0707	0,00037
12	130,284	1,0857	0,00039
14	154,126	1,1009	0,00042
16	178,592	1,1162	0,00044
18	203,742	1,1319	0,00047
20	229,560	1,1478	0,00049
22	256,080	1,1640	0,00051
24	283,296	1,1804	0,00053
26	311,272	1,1972	0,00055

Greutatea specifică a soluțiilor de $MgCl_2$ la + 20° este dată în tabela 18.

Tabela 18. Greutatea specifică la + 20° (numeric egală cu d_4^{20}) a soluțiilor de $MgCl_2$

$MgCl_2$ /apă, %	Concentrație, g/l	d_4^{20}	$-\frac{\partial d}{\partial t}$
2	20,300	1,015	+0,000072
8	85,232	1,0654	-0,000035
14	156,772	1,1198	-0,000050
20	235,130	1,1757	-0,000044
26	321,178	1,2353	-0,000046
32	415,328	1,2979	-0,000051

Greutatea specifică la + 20° a soluțiilor de $MgSO_4$ este dată în tabela 19.

Tabela 19. Greutatea specifică la + 20° (numeric egală cu d_4^{20}) a soluțiilor de $MgSO_4$

$MgSO_4$ /apă, %	Concentrație, g/l	Densitate d_4^{20}	$-\frac{\partial d}{\partial t}$
2	20,372	1,0186	0,00023
4	41,568	1,0392	0,00025
6	63,612	1,0602	0,00027
8	86,522	1,0816	0,00029
10	110,340	1,1034	0,00031
12	135,072	1,1256	0,00033
14	160,776	1,1484	0,00034
16	187,472	1,1717	0,00035
18	215,190	1,1955	0,00036
20	243,960	1,2198	0,00037
22	273,834	1,2441	0,00037
24	304,824	1,2701	0,00038
26	336,986	1,2967	0,00038

Greutatea specifică la + 20° a soluțiilor de $CaCl_2$ este dată în tabela 20.

Tabela 20. Greutatea specifică la + 20°C (numeric egală cu d_4^{20}) a soluțiilor de $CaCl_2$

$CaCl_2$ /apă, %	Concentrație, g/l	Densitatea d_4^{20}	$-\frac{\partial d}{\partial t}$
1	10,070	1,0070	0,00021
2	20,296	1,0148	0,00023
4	41,264	1,0316	0,00025
6	62,916	1,0486	0,00027
8	85,272	1,0659	0,00029
10	108,350	1,0835	0,00031
12	132,180	1,1015	0,00033
14	156,772	1,1198	0,00035
16	182,176	1,1386	0,00038
18	208,404	1,1578	0,00040
20	235,500	1,1775	0,00042
25	307,100	1,2284	0,00047
28	352,884	1,2603	0,00050
30	384,480	1,2816	0,00052
35	468,055	1,3373	0,00056
40	558,280	1,3957	0,00060

*) Din cauza mineralizației foarte deosebite a diferitelor ape de zăcămint sau întâlnite în industria extractivă a petrolului, caracteristicile redade în acest capitol se referă în parte la ape reale de zăcămint (și în acest caz, cînd nu este indicat altfel, se înțelege, în general, ape saturate parțial, —26 % — cu NaCl și cu MgO_2 în raport relativ 4/1–5/1) în parte la soluții de NaCl cu concentrații variabile, în general indicate. În cazul lipsei precizării mineralizării valorile citate trebuie considerate numai ca indicative.

Greutatea specifică la $+20^\circ$ a soluțiilor de Na_2SO_4 este dată în tabela 21.

Tabela 21. Greutatea specifică la $+20^\circ\text{C}$ (numeric egală cu d_4^{20}) a soluțiilor de Na_2SO_4

$\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{apă},$ %	Concentrația, g/l	Densitatea d_4^{20}	$\frac{\partial d}{\partial t}$
1	10,073	1,0073	0,000016
2	20,238	1,0164	0,000020
3	30,768	1,0256	0,000024
4	41,392	1,0348	0,000032
5	52,205	1,0441	0,000038

Observații. Concentrațiile de Na_2SO_4 întâlnite (rareori) în apele naturale din sistemele zăcămintelor de petrol sint, în general, sub 1%.

În soluții diluate, greutatea specifică este o proprietate aditivă care poate fi calculată aproximativ pe baza analizei chimice, însă, în general, se preferă măsurarea ei directă cu picnometrul sau cu areometrul.

Scara Baumé, concepută pentru a determina direct concentrația soluțiilor de NaCl , care are diviziunea 10° corespunzătoare soluției cu 10% și diviziunea 0° corespunzătoare apei pure,

$$d_{14}^{15} = \frac{146,78}{146,78 - Be} \quad (77)$$

nu corespunde decât aproximativ scopului urmărit, din cauza variației compoziției ClNa chiar de uz alimentar.

2. Viscositatea apei mineralizate variază în funcție de temperatură, de concentrație și de natura substanțelor în soluție și, în mică măsură, de presiune. Cunoașterea viscozității apei sărate prezintă un interes deosebit în problema injectării de apă în zăcămint, sporul de viscozitate față de apa dulce provocând un mic consum suplimentar de energie, deobicei, însă, compensat de avantajele asi-

gurate de calitățile de floculare ale apei sărate (v. tabela 22).

3. Compresibilitatea elastică a apei sărate este mult mai puțin studiată decât aceea a apei dulci, de care se deosebește în general, foarte puțin, în minus.

Compresibilitatea elastică a apei saturate cu gaze este în general, mai mare, diferența accentuându-se la presiuni mari. În problemele de hidraulică propriu zisă, diferența nu influențează decât foarte puțin și numai în cazul curgerilor nestaționare. La aplicarea, însă, a ecuațiilor de bilanț material în care intră coeficientul de volum (funcția primitivă corespunzătoare compresibilității), neglijarea poate provoca uneori erori sensibile (v. fig. 91).

4. Coeficientul de dilatare termică al apei sărate ca și acela al apei cu gaze în soluție pot fi luați, practic, egali cu cei ai apei dulci (v. și fig. 92).

5. Capacitatea de a dizolva solidele intervine rar în problemele de zăcămint. Saturația este întâlnită relativ rar în ce privește NaCl și relativ mai des în ce privește CaCO_3 (v. și IV B.b.1.). În ce privește gazele, solubilitatea lor este mult mai mult în funcție de presiune

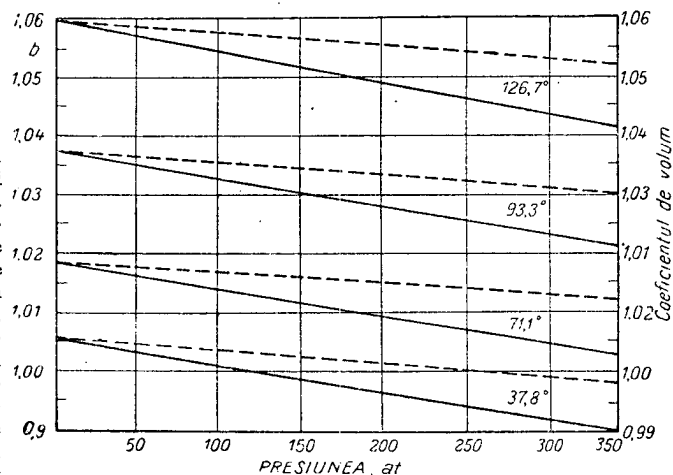


Fig. 91. Variația coeficientului de volum al apei cu gaze (metan 90%), în funcție de presiune și de temperatură.

Tabela 22. Viscositatea soluțiilor de NaCl , de diferite concentrații, la diferite temperaturi, în poise (dyne s/cm^2)

Apă distilată		Soluție NaCl în apă 5%		Soluție NaCl în apă 10%		Soluție NaCl în apă 20%	
$T, ^\circ\text{C}$	μ	$T, ^\circ\text{C}$	μ	$T, ^\circ\text{C}$	μ	$T, ^\circ\text{C}$	μ
0	0,01716	0	0,01861	0,06	0,02035	0,72	0,02591
5	0,01515	4,90	0,01605	4,99	0,01738	1,24	0,02547
10	0,01309	10,89	0,01357	11,80	0,01450	5,46	0,02240
15	0,01146	20,22	0,01078	20,46	0,01181	5,95	0,02203
20	0,01008	30,12	0,00872	30,72	0,00947	12,48	0,01847
25	0,00897	40,86	0,00714	40,30	0,00797	21,20	0,01499
30	0,00803	50,19	0,00614	50,72	0,00571	30,69	0,01222
35	0,00721	60,84	0,00524	60,67	0,00584	40,57	0,01013
40	0,00653	70,10	0,00455	70,72	0,00512	51,65	0,008425

(crescătoare) decât de temperatură (descreșcătoare). Legea liniară de solubilitate a lui Henry are, în general o aplicabilitate insuficientă, la presiunile relativ mari din zăcămint.

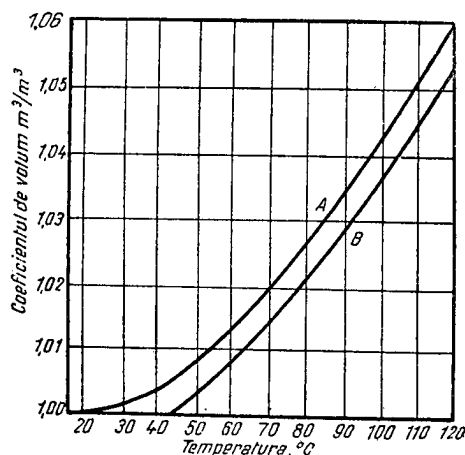


Fig. 92. Coeficientul de volum al apei pure și al apei saturate cu gaze la presiunea de 280 kg/cm², în funcție de temperatură: A — pentru apă pură; B — pentru apa saturată cu gaze.

Solubilitatea aerului în apă interesează în deosebi la operațiile de pregătire și de injecție a apei, prin acțiunea oxigenului conținut (v. tabela 23).

Tabela 23. Solubilitatea aerului și a componentelor lui în apa pură (fără CO₂ sau NH₃), fracțiunea dizolvată la presiunea atmosferică și la temperatura respectivă (v. coeficientul de solubilitate), $\frac{m^3 N}{m^3, at}$

$t, ^\circ C$	[O ₂] $\times 10^3$	[N ₂ + Ar] $\times 10^3$	[Aer] $\times 10^3$
0	10,19	18,99	29,18
10	7,87	14,97	22,84
15	7,04	13,51	20,55
20	6,36	12,32	18,68
25	5,78	11,30	17,08
30	3,26	10,38	15,64

Observație. Simbolul [] reprezintă aici concentrația totală.

Datorită existenței în aerul atmosferic a $3-4 \cdot 10^{-4}$ CO₂ și importanței prezenței acestuia în apele de injecție, se consideră pentru solubilitatea CO₂ în apă (liberă de CO₂Ca), solubilitatea dată în tabela 24.

În cazul prezenței de CO₂Ca, solubilitatea CO₂ crește mult, în deosebi cu presiunea (v. Cap. IV. B.b.5.e).

Solubilitatea hidrogenului sulfurat interesează prin corosivitatea pe care o imprimă apei (v. tabela 25).

Solubilitatea gazelor naturale în apă variază în funcție de compoziția lor, de presiune și

Tabela 24. Solubilitatea anhidridei carbonice în apă distilată, în funcție de temperatură $\alpha = m^3 N/m^3 at$ p este exprimat în g/g

$t, ^\circ C$	$\alpha \cdot 10^3$	$p \cdot 10^3$	$t, ^\circ C$	$\alpha \cdot 10^3$	$p \cdot 10^3$
0	1,713	0,3346	30	0,665	0,1257
5	1,424	0,2274	35	0,592	0,1105
10	1,194	0,2318	40	0,530	0,0973
15	1,019	0,1970	45	0,479	0,0860
20	0,878	0,1688	50	0,436	0,0761
25	0,759	0,1499	60	0,359	0,0576

Tabela 25. Coeficientul de solubilitate al hidrogenului sulfurat în funcție de temperatură $\times 10^3$, $\frac{m^3 N}{m^3 at}$

$t, ^\circ C$	$10^3 [H_2S]$	$t, ^\circ C$	$10^3 [H_2S]$
0	4,670	40	1,660
5	3,977	45	1,516
10	3,399	50	1,392
15	2,945	60	1,190
20	2,582	70	1,022
25	2,282	80	0,917
30	2,037	90	0,840
35	1,831	100	0,810

de temperatură. Pentru metan și pentru etan, constituind, practic, integral gazele nelichefiabile (gazele sărace propriu zise), coeficienții de solubilitate α , sînt dați în tabela 27. Solubilitatea lor la presiuni înalte și la temperaturi nu prea înalte nu constituie însă un fenomen pur fizic, ci unul fizico-chimic (formare de hidrați de gaze sau criohidrați (v. Cap. IV. B.d.2.b), conform unor legi deosebite de cea liniară.

Tabela 26. Coeficienții de solubilitate α ai metanului și ai etanului în apa pură, $m^3 N/m^3 at$

$t, ^\circ C$	α pentru metan	α pentru etan	$t, ^\circ C$	α pentru metan	α pentru etan
0	0,05563	0,09874	45	0,02238	0,02660
5	0,04805	0,08033	50	0,02134	0,02459
10	0,04177	0,06561	60	0,01954	0,02177
15	0,03690	0,05504	70	0,01825	0,01948
20	0,03308	0,04724	80	0,01770	0,01826
25	0,03006	0,04104	90	0,01735	0,0176
30	0,02762	0,03624	100	0,0170	0,0172
35	0,02546	0,03230			
40	0,02369	0,02915			

Pentru hidrocarburile nesaturate, solubilitatea în apă crește cu gradul de nesaturație (de exemplu la 0°, $\alpha = 0,09874$ pentru etan, $\alpha = 0,226$ pentru eten și $\alpha = 1,73$ pentru etin.

Solubilitățile în apă, α , ale termenilor seriei parafinice, C_nH_{2n+2} cresc treptat de la metan pînă la butan pentru a scădea apoi, treptat, cu creșterea greutatei moleculare, (v. tabela 27).

Tabela 27. Variația cu greutatea moleculară, a solubilității alcanilor în apă distilată

Hidrocarbura	Solubilitatea la 15°	
	m ³ N/m ³ ·at	kg/m ³ ·at
CH ₄	0,03690	0,024
C ₂ H ₆	0,05504	0,064
C ₃ H ₈	0,500 *	0,93 *
C ₄ H ₁₀	2,10 *	5,50 *
C ₅ H ₁₂	1,20 *	3,60 *
C ₆ H ₁₄	0,38 *	1,36 *
C ₇ H ₁₆	0,15 *	0,50 *
C ₈ H ₁₈	0,04 *	0,14 *

*) Valori aproximative, nesigure, din cauza numărului redus de experiențe și a condițiilor nefavorabile

Observația I. Anomalia de solubilitate a termenilor C₃—C₈ pare că se datorește tot formării unuia sau mai multor compuși definiți dar relativ labili.

Observația II. Coeficienții se referă la gazul dizolvat, măsurat după degajare, în stare gazoasă — standard (pentru C > 4, numai ipotetic, pentru comparație).

La presiuni mai înalte, solubilitățile, depărate de orice lege analitică, se determină exclusiv

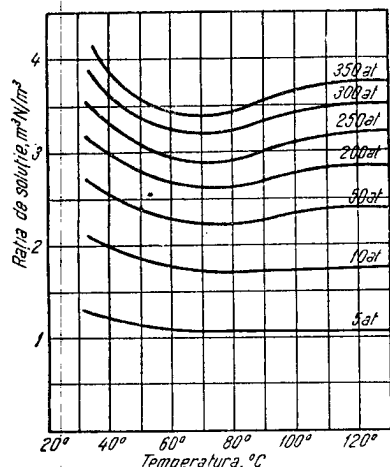


Fig. 93. Solubilitatea hidrocarburilor gazoase în apă dulce.

experimental. Oarecare interes îl prezintă solubilitățile anhidridei carbonice (v. tabela 28)

Tabela 28. Solubilitatea anhidridei carbonice în apă la presiuni mari

Presiunea, at	Rația de soluție în m ³ N/m ³ la temperatura t =			Presiunea, at	Rația de soluție în m ³ N la temperatura t =	
	+20°C	+35°C	+60°C		+60°C	+100°C
25	16,3	—	—	70	14,2	6,5
30	18,2	10,6	—	80	16,3	7,4
35	20,1	12,4	—	90	18,8	8,5
40	22,0	14,2	8,5	100	21,4	9,7
45	23,9	16,1	9,3	110	24,3	10,8
50	25,7	18,0	10,2	130	—	12,7
60	—	21,7	12,1	150	—	15,1

ale hidrocarburilor gazoase (brute, gaz natural) în apă (v. fig. 93) cum și a apei în hidrocarburile lichide (v. tabela 29).

Tabela 29. Solubilitatea apei în hidrocarburile lichide (rație de soluție în mol %, respectiv fracție molară)

Temperatura, t°	Presiunea minimă, at	În benzen, mol %	În toluen, mol %	În xilen, mol %	În țitei de greutate moleculară (ca fracție molară)		
					120	135	165
50	0,125	0,014	0,0028	0,0013	—	—	—
100	1,00	0,042	0,010	0,0043	—	—	—
150	4,70	0,125	0,038	0,015	1,003	0,0022	—
200	15,3	0,390	0,135	0,050	0,0165	0,013	0,004
250	39,1	1,15	0,52	0,165	0,098	0,078	0,039
300	84,4	3,40	1,90	0,57	0,58	0,47	—

Pentru a se determina solubilitatea hidrocarburilor gazoase în apă sărată se folosește solubilitatea rezultată din fig. 93, aplicându-i-se corecția

$$S_s = S_d (1 - 10 \cdot \sigma \cdot a) \quad (78)$$

în care:

- S_d este solubilitatea în apă dulce citită în diagrama din fig. 93;
- S_s — solubilitatea în apă sărată;
- σ — salinitatea apei %;
- a — un factor de corecție conform tabeli 30.

Tabela 30. Factorii de corecție pentru reducerea solubilității gazelor în apă, datorită salinității

t° =	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°
a =	0,72	0,64	0,55	0,49	0,47	0,44	0,41	0,36	0,32

6. Conductibilitatea electrică. Rezistivitatea electrică a soluțiilor saline poate fi determinată teoretic prin relația

$$\rho_0 = \frac{10}{\varepsilon (a l_{ca} \alpha_a + k l_{ck} \alpha_k)}$$

unde:

- a și k sînt concentrațiile globale în anioni, respectiv cationi ale soluției în gram-echivalenți;
- l_{ca} și l_{ck} — mobilitățile lor electrolitice la concentrația respectivă, c ;
- α_a și α_k — gradele de disociere ale sărurilor în compoziția cărora intră ionii respectivi.

Pentru un electrolit ce se disociază numai în doi ioni:

$$\rho_0 = \frac{10^{-2} \vartheta}{(l_{ca} + l_{ck}) \alpha}$$

unde

- ϑ = cantitatea de solvent (în cm³) necesară dizolvării unui g.mol de sare pentru obținerea electrolitului de concentrația c , respectivă, a soluției;
- α = gradul de disociere al sării respective.

Din cauza concentrațiilor relativ mici ale apelor de strat sau de sondă (cu excepție unora din apele de strat) și din cauza vitezelor apropiate ale diferiților ioni, există posibilitatea practică de a se substitui sărurile prezente în cantități mici prin concentrații echivalente,

pune astfel că radicalii acizilor cu grad de disociere mare (SO_4'' , Cl' , NO_3') se combină cu radicalii bazici (Li' , Na , K') cu grad de disociere mare, dând naștere «salinității primare» (S_1).

În cazul când bazele cu grad de disociere mare

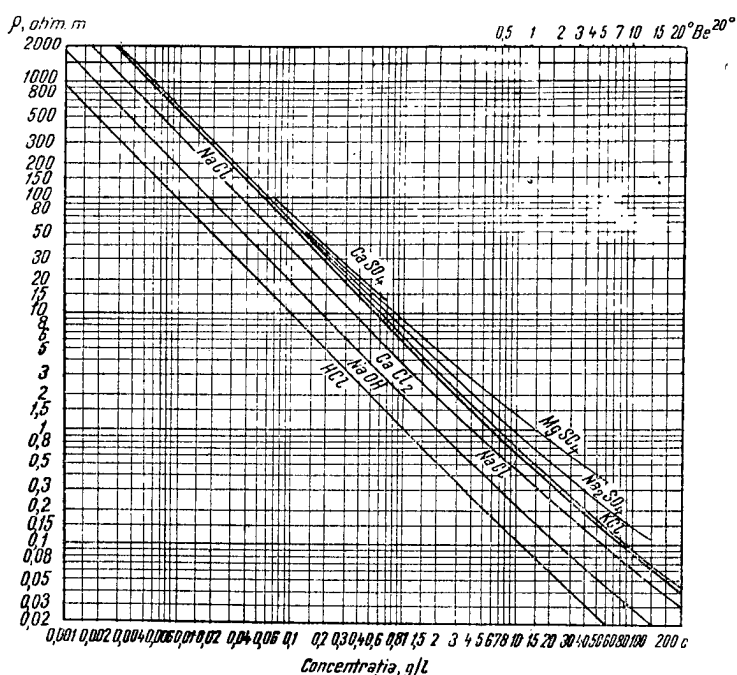


Fig. 94. Variația rezistivității soluțiilor saline cu concentrația la temperatură de 20°C.

în sarea predominantă. Pentru calculele practice și pentru verificarea acestei aproximații, sînt redate în fig. 93 bis variațiile rezistivităților soluțiilor de MgSO_4 , Na_2SO_4 , CaSO_4 , KCl , NaCl , CaCl_2 , NaOH și HCl cu concentrația. Este de observat apropierea strînsă a a curbelor $\rho = f(c)$ pentru sărurile prezente în apele de zăcămint, în gama $0 < c < 1$ gram/litru, precum și paralelismul lor remarcabil pînă în apropierea concentrațiilor de saturatie. Aceasta justifică pe deplin aproximația propusă, a echivalenței sărurilor, îndeosebi în scopul citat la capitoul III, B.b.9.a)3).

c. Mineralizația apelor

1. Compoziția mineralizației. Mineralizația apelor este studiată prin analiza cantitativă, ale cărei rezultate directe reprezintă, în general, conținutul de corpi străini, exprimat în fracțiune ponderală pentru fiecare anion (ion de radical cu proprietăți acide) și pentru fiecare cation (ion de radical cu proprietăți bazice), de obicei în mg/l sau în g/m³. Deoarece analiza nu poate da direct forma sub care sînt combinați acești ioni, se recurge pentru determinarea acestora la ipoteze ajutătoare. Se presu-

se găsesc în proporție mai mare decît cea necesară saturării acizilor menționați, excesul de baze tari se combină cu acizii slabi (CO_3'' , HCO_3' , S''), pentru a da naștere «alcalinității primare» (A_1).

În cazul cînd acizii tari, (cu grad de disociere mare) se găsesc în proporție mai mare decît cea necesară neutralizării bazelor tari, excesul de acizi se combină cu bazele slabe (Ca , Mg , Sr) dînd naștere «salinității secundare» (S_2).

Se observă că «alcalinitatea primară» și «salinitatea secundară» se exclud reciproc.

Celelalte baze slabe, necombinate cu acizi tari, se combină cu cei slabi pentru a da naștere «alcalinității secundare». (A_2).

În cazurile (rare în natură) cînd acizii tari se găsesc în proporție suficientă pentru a neutraliza atît bazele tari cît și pe cele slabe, eventualul exces din acești acizi rămîne liber, constituind «salinitate terțiară» (S_3) (în sensul că ar fi neutralizați de hidrogen care s-ar comporta ca un metal slab) sau aciditatea liberă.

Prin extensiune se înglobează în « S_3 » și eventualul exces de acizi tari, neutralizat cu $\text{Al}\dots$ sau cu $\text{Fe}\dots$.

Se observă că «alcalinitatea secundară» și «salinitatea terțiară» (aciditatea) se exclud reciproc.

Celelalte baze slabe Al^{+++} și Fe^{+++} , necombinate cu acizii tari, se combină cu acizii slabi, dând naștere «alcalinității terțiare» (A_3). Se observă de asemenea că A_3 exclude S_3 și reciproc.

Pentru determinarea valorilor S_1 , A_1 , S_2 , A_2 , S_3 și (sau) A_3 , se divide fiecare dintre conținuturile ponderale într-un ion oarecare prin raportul dintre greutatea acestuia și greutatea hidrogenului, care s-ar substitui ipotetic acestuia, obținându-se conținutul în ioni de hidrogen, echivalenți din punct de vedere reactiv ionului considerat.

Dacă se notează cu a_i — fracțiunea ponderală de ioni i (de exemplu înmulțită cu 10^6 , adică exprimată în mg/l);

1 — greutatea relativă a atomului de H (mai exact 1,008);

p_i — greutatea atomică a elementului care dă naștere ionului i .

n_i — valența acestui element în radicalul care dă naștere ionului i

în acest caz,

$$r_i = \frac{a_i}{\frac{p_i}{1 \cdot n_i}} = a_i \cdot \frac{n_i}{p_i} \quad (79)$$

este echivalentul reactiv (subînțeles «de hidrogen») al ionului i , exprimat în aceeași fracțiune de greutate. De aceea, factorul n_i/p_i este numit și «coeficient de reacție» (v. tabela 31).

Pentru o apă neutră, suma echivalenților reactivi și radicalilor acizi trebuie să fie egală cu suma echivalenților reactivi a radicalilor bazei.

Pentru a înlesni interpretarea compoziției mineralizate, independent de conținutul total de substanțe în soluție, se obișnuiește să se transforme valorile r_i în valori procentuale:

$$P_i = \frac{r_i}{\sum r_i} \cdot 100\%. \quad (80)$$

Tabela 31. Coeficienții de reacție ai principalilor ioni întâlniți în apele de zăcămint

Radicali acizi	Coeficientul de reacție	Radicali bazei	Coeficientul de reacție
$SO_4^{''}$	0,02083	Li^+	0,14409
Cl^-	0,02820	Na^+	0,04348
Br^-	0,01252	Ca^{++}	0,04992
I^-	0,00798	K^+	0,02558
$CO_3^{''}$	0,03333	Mg^{++}	0,08224
$HCO_3^{'}$	0,01639	Sr^{++}	0,02283
$S^{''}$	0,06240	Ba^{++}	0,01455
$HS^{'}$	0,03054	Al^{+++}	0,11125
		Fe^{+++}	0,05370
		Fe^{++}	0,03581

O analiză sumară a unei ape de sondă este dată în tabela 32.

Tabela 32. Analiza sumară a unei ape de sondă și exprimarea ei în % echivalenți

Radicalul	a_i mg/l	n_i/p_i coeficien- tul de reacție	Y_i echiva- lentul reactiv mg, H/l	P_i % echiva- lenți
Sodiu (Na^+ *) (incl. K^+)	11 074,5	0,04348	481,52	44,22%
Calcium (Ca^{++})	528,8	0,04992	26,38	2,42%
Magneziu (Mg^{++})	444,8	0,08224	36,56	3,36%
Total cationi			544,46	50,00%
Clor Cl^-	17 833,4	0,02820	502,90	46,18%
Sulfat $SO_4^{''}$	25,1	0,02083	0,52	0,05%
Carbonat $CO_3^{''}$	—	—	—	—
Hidrocarbonat $HCO_3^{'}$	2 504,35	0,01639	41,04	3,77%
Total mineralizație	32 410,95		1 088,92	100,00%

*) Asimilarea ionilor K^+ cu Na^+ și includerea lor în Na^+ sînt justificate de valoarea foarte redusă a aportului pK/pNa și necesare din cauza dificultăților separării cantitative, în aceste condiții a ionilor Na^+ și K^+ .

Observație. Din cauza prezenței în cantități foarte reduse a ionului K^+ , acesta a fost dozat împreună cu Na^+ .

În cazul acestei compoziții se observă că salinitatea primară este dată de combinarea a 44,22% echivalenți baze tari cu o cantitate egală cu echivalenți din Cl , astfel încît rezultă $S_1 = 44,22\% + 44,22\% = 88,44\%$. Deoarece din 46,18% echivalenți Cl , 44,22% s-au combinat cu $(Na + K)$, restul de 1,96% se combină cu 1,96% echivalenți din cei 5,78% echivalenți $(Ca + Mg)$, pentru a da naștere la 1,96% + 1,96% = 3,92% echivalenți — salinitate secundară, S_2 . Restul de 3,82% (5,78 — 1,96) echivalenți $(Ca + Mg)$ se combină cu 3,82% echivalent $(SO_4^{''} + HCO_3^{'})$, pentru a da 3,82 + 3,82 = 7,64% echivalenți — alcalinitate secundară, astfel încît formula acestei ape este

$$88,44\% + 3,92\% + 7,64\% = 100\% \quad (81)$$

$$S_1 + S_2 + A_2 = 100\%.$$

2. Clasificarea apelor după mineralizație. Numărul mare de sisteme de clasificare propuse indică insuficiența lor relativă. Clasificarea Stabler-Palmer folosită în mod curent, este bazată pe parametrii S_1 , S_2 , A_1 , A_2 , A_3 , S_3 și cuprinde:

Clasa I: apele alcaline, caracterizate prin

$$\sum (pNa + pK + pLi) > \sum (pCl + pSO_4 + pNO_3),$$

care cuprinde, în general:

$$\begin{aligned} S_1 &= 2 \sum (\rho \text{Cl} + \rho \text{SO}_4 + \rho \text{NO}_3); \\ A_2 &= 2 \sum (\rho \text{Ca} + \rho \text{Mg}); \\ A_1 &= 2 \sum (\rho \text{Na} + \rho \text{K} + \rho \text{Li}) - \\ &\quad - \sum (\rho \text{Cl} + \rho \text{SO}_4 + \rho \text{NO}_3) \end{aligned} \quad (82)$$

și care au drept caracteristică prezența alcalinității primare, A_1 , eventual inclusiv A_2 .

Clasa II: apele neutre, caracterizate prin

$$\begin{aligned} \sum (\rho \text{Na} + \rho \text{K} + \rho \text{Li}) &= \\ = \sum (\rho \text{Cl} + \rho \text{SO}_4 + \rho \text{NO}_3), \end{aligned} \quad (83)$$

care cuprind, practic, numai S_1 și A_2 , având caracteristica $S_2 = A_1 = 0$.

Clasa III: apele dure, caracterizate prin

$$\begin{aligned} \sum (\rho \text{Cl} + \rho \text{SO}_4 + \rho \text{NO}_3) &> \\ > \sum (\rho \text{Na} + \rho \text{K} + \rho \text{Li}), \end{aligned}$$

restul acidității tari fiind saturat cu metale alcaline pămîntoase. Ele cuprind:

$$\begin{aligned} S'_1 &= 2 \sum (\rho \text{Na} + \rho \text{K} + \rho \text{Li}) \\ S_2 &= 2 \sum (\rho \text{Cl} + \rho \text{SO}_4 + \\ &\quad + \rho \text{NO}_3) - \sum (\rho \text{Na} + \rho \text{K} + \rho \text{Li}) \\ A_2 &= 2 \left\{ \sum (\rho \text{Ca} + \rho \text{Mg}) - \left[\sum (\rho \text{Cl} + \right. \right. \\ &\quad + \rho \text{SO}_4 + \rho \text{NO}_3) - \sum (\rho \text{Na} + \\ &\quad + \rho \text{K} + \rho \text{Li}) \left. \right] \right\} = 2 \sum (\rho \text{CO}_3 + \rho \text{HCO}_3 + \\ &\quad + \rho \text{HS} + \rho \text{S}). \end{aligned} \quad (84)$$

și au drept caracteristică $S_2 > 0$, $A_2 > 0$.

Clasa IV: apele dure, lipsite de excesul de baze alcaline necesar formării alcalinității secundare, caracterizate prin

$$\begin{aligned} \sum (\rho \text{Cl} + \rho \text{SO}_4 + \rho \text{NO}_3) &= \\ = \sum (\rho \text{Na} + \rho \text{K} + \rho \text{Li}) + \\ &\quad + \sum (\rho \text{Ca} + \rho \text{Mg}) \end{aligned} \quad (85)$$

și care cuprind

$$\begin{aligned} S_1 &= 2 \sum (\rho \text{Na} + \rho \text{K} + \rho \text{Li}) \\ S_2 &= 2 \left\{ \sum (\rho \text{Cl} + \rho \text{SO}_4 + \right. \\ &\quad + \rho \text{NO}_3) - \sum (\rho \text{Na} + \rho \text{K} + \\ &\quad + \rho \text{Li}) \left. \right\} = 2 \sum (\rho \text{Ca} + \rho \text{Mg}) \end{aligned}$$

și au drept caracteristică $A_2 = 0$.

Clasa V: apele cu aciditate liberă, caracterizate prin

$$\begin{aligned} 2 (\rho \text{Cl} + \rho \text{SO}_4 + \rho \text{NO}_3) &> \sum (\rho \text{Na} + \\ &\quad + \rho \text{K} + \rho \text{Li}) + \sum (\rho \text{Ca} + \rho \text{Mg}) + \\ &\quad + \sum (\rho \text{Al} + \rho \text{Fe}), \end{aligned} \quad (86)$$

care cuprind:

$$\begin{aligned} S_1 &= 2 \sum (\rho \text{Na} + \rho \text{K} + \rho \text{Li}) \\ S_2 &= 2 \sum (\rho \text{Ca} + \rho \text{Mg}) \\ S_3 &= 2 \left\{ \sum (\rho \text{Cl} + \rho \text{SO}_4 + \rho \text{NO}_3) - \right. \\ &\quad - \sum (\rho \text{Na} + \rho \text{K} + \rho \text{Li}) - \sum (\rho \text{Ca} + \rho \text{Mg}) \left. \right\} = \\ &= 2 \sum (\rho \text{Fe} + \rho \text{Al}) + \sum (\rho \text{SO}_4 \text{H}_2 + \\ &\quad + \rho \text{ClH} + \rho \text{NO}_3 \text{H}), \end{aligned}$$

a căror caracteristică este prezența salinității terțiare S_3 , însoțită sau nu de o aciditate liberă efectivă (subclase).

Deși considerată în mod curent ca suficientă, această clasificare are următoarele inconveniente:

a) nu ține seama de raporturile $\rho \text{Cl}/\rho \text{SO}_4$, ρNO_3 , dintre anionii acizilor tari, $\rho \text{Ca}/\rho \text{Mg}$, dintre cationii metalelor alcaline pămîntoase $\rho \text{CO}_3/\rho \text{HCO}_3/\rho \text{HS}/\rho \text{S}$, dintre anionii acizilor slabi, $\rho \text{Na}/\rho \text{K}/\rho \text{Li}$, dintre cationii metalelor alcaline etc. (citate în ordinea importanței);

b) datorită numărului insuficient de parametri examinați nu dă decât informații foarte reduse asupra originii și asupra geneticii apei respective, reducând posibilitățile de corelare și de identificare.

Clasificarea lui V. A. Sulin, încă insuficient răspîndită în R.P.R., completează aceste lacune prin examinarea unor parametri care nu sînt legați de predominanța anumitor ioni, ci de prezența chiar în cantitate mică a unor componenți caracteristici și anume: Na_2SO_4 , NaHCO_3 , MgCl_2 și CaCl_2 , conform schemei din tabela 33.

Observații. În această clasificare, diviziunea de ordinul I (tipul) nu este determinată de compusul predominant, ci de cel caracteristic, chiar dacă el se găsește în cantitate redusă. Ea precizează locul și condițiile de existență a apei respective și, în oarecare măsură, sensul procesului de mineralizare, respectiv demineralizare.

Diviziunea de ordinul II (grupa) este determinată de anionul predominant cantitativ și indică etapa de transformare. Diviziunea de ordinul III (subgrupa) este determinată de cationul predominant și precizează în oarecare măsură stadiul procesului de mineralizare, respectiv de demineralizare.

Tabela 33

I. APE DE TIPUL SO_4Na_2	II. APE DE TIPUL NaHCO_3	III. APE DE TIPUL MgCl	IV. APE DE TIPUL CaCl_2
Caracteristică $0 < \frac{\rho\text{Na} - \rho\text{Cl}}{\rho\text{SO}_4} < 1$	Caracteristică $\frac{\rho\text{Na} - \rho\text{Cl}}{\rho\text{SO}_4} > 1$	Caracteristică $0 < \frac{\rho\text{Cl} - \rho\text{Na}}{\rho\text{Mg}} < 1$	Caracteristică $\frac{\rho\text{Cl} - \rho\text{Na}}{\rho\text{Mg}} > 1$
A. Grupă bicarbonați I. Clasa A_2 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» B. Grupă sulfati 1. Clasa S_2 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» 2. Clasa S_1 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» c) Subgrupă «Na» C. Grupă cloruri 1. Clasa S_1 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» c) Subgrupă «Na»	A. Grupă bicarbonați I. Clasa A_2 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» c) Subgrupă «Na» 2. Clasa A_1 a) Subgrupă «Na» 3. Clasa S_1 a) Subgrupă «Na» B. Grupă sulfati 1. Clasa S_1 a) Subgrupă «Na» C. Grupă cloruri 1. Clasa S_1 a) Subgrupă «Na»	A. Grupă bicarbonați 1. Clasa A_2 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» B. Grupă sulfati 1. Clasa S_2 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» 2. Clasa S_1 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» C. Grupă cloruri 1. Clasa S_1 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» c) Subgrupă «Na» 2. Clasa S_2 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg»	A. Grupă bicarbonați 1. Clasa A_2 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» B. Grupă sulfati 1. Clasa S_2 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» 2. Clasa S_1 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» C. Grupă cloruri 1. Clasa S_1 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg» c) Subgrupă «Na» 2. Clasa S_2 a) Subgrupă «Ca» b) Subgrupă «Mg»

3. Ciclul de mineralizare-demineralizare al apei în lito-hidro-atmosferă după Vernadski-Sulin cuprinde: 1) o demineralizare datorită evaporării din mări și din oceane; 2) o mineralizare treptată prin curgerea la suprafață și prin infiltrare-circulație în părțile superioare ale litosferei; 3) etape intermediare de evaporare-reconcentrare; și eventual, 4) o reechilibrare a mineralizației prin revenirea în masa oceanică. Apele întâlnite în industria petrolului cuprind numai ape din fazele (2) și (3). Pentru studiul lor, V. A. Sulin propune să se urmărească, în primul rând, evoluția în spațiu a apei și mineralizarea ei determinată, în general de natura ultimelor roci cu care s-a găsit în contact și, în al doilea rând, evoluția succesivă a unei anumite cantități de apă, în funcție de succesiunea rocilor atinse sau străbătute.

Metoda constă în faptul că după precădere studiului remineralizării rocilor prin transformări de echilibru în contact cu apa. Se disting cinci faze: 2a) o fază cloruri (predominant de Na și Mg) și parțial sulfati de Ca și Mg; 2b) o fază sulfati (predominant de Mg și Ca) și parțial NaCl; în apele uscatului, în această fază este caracteristică prezența sulfatului de sodiu, produs de reacție; 2c) o fază bicarbonat de Ca, rezultat din spălarea carbonaților de Ca din roci de către apele cu CO_2 atmosferici; 2d) o fază bicarbonat de sodiu, în stadiul mai înaintat al dezagregării feldspaților și al feldspatoizilor; și 2e) o fază sialitică, finală, în care apele atacă scheletul aluminosilicios al rocii, eliminând Fe_2O_3 și Al_2O_3 .

Fazele 2a, 2b și 2c sînt relativ frecvente. Faza 2d, deși suprapusă în parte celor precedente, este relativ rară; în primele faze, prezența NaHCO_3 este mascată de restul abundent de mineralizație, iar în faza 2d propriu zisă, constatarea prezenței NaHCO_3 este îngreunată de labilitatea acestuia în condițiile atmosfere-

rice. Faza 2e este, de asemenea, relativ rară, deoarece în natură probabilitatea prelungirii atât de înaintate a fazei, 2, este foarte redusă. Se întâlnește numai în mediul subtropical.

Faza 3 poate să apară atât ca urmare a fazelor 2a...e, cât și direct din mediul marin, substituindu-se fazei 1 (concentrare în mări închise și în lagune a apelor de mare). Această variantă a fazei 3 interesează din punctul de vedere al genezei petrolului chiar mai mult decît varianta normală. Indicele care permite să se distingă între apele provenite din aceste două variante este prezența exclusivă a sulfatului de sodiu în apele de reconcentrare (varianta normală), respectiv absența lui în apele de concentrare directă.

Prezența și preponderența clorurilor în apele de proveniență din varianta (3) directă se datoresc conținutului inițial mare în cloruri al apelor oceanice, rezultat din: migrația mult mai ușoară de la uscat la mare a clorurilor față de sulfati, aportul permanent de cloruri al fenomenelor vulcanice și consumarea sulfatului și a carbonatului de Ca în procesele biologice din mediul oceanic. ($\rho\text{Na}/\rho\text{Cl} \approx 40$ în litosferă față de $\rho\text{Na}/\rho\text{Cl} \approx 0,87$ în apele oceanice).

Pe acest criteriu, V. A. Sulin distinge trei tipuri de ape de suprafață: tipul marin, în care predomină clorurile, în special clorura de sodiu (în cazul normal, respectiv clorura de magneziu în cazul apelor cu concentrație înaintată), dar indicele caracteristic îl constituie prezența clorurii de magneziu; tipul sulfat de sodiu, continentale, datorită stadiului inițial de demineralizare a rocilor cu compoziție variată, care prezintă ca indice caracteristic un conținut, chiar redus, de sulfat de sodiu; și tipul bicarbonat de sodiu, continentale, însă, datorită unui stadiu avansat de demineralizare a rocilor,

caracterizat prin prezența bicarbonatului de sodiu.

Mineralizarea *apelor de adâncime* este mult mai variată decât aceea a apelor de suprafață, a căror viteză de circulație și ale căror posibilități de comunicație le permit o oarecare uniformizare regională a mineralizației. Apele de adâncime au o mineralizație cu compoziția mult mai apropiată de aceea a rocii cu care ajung în contact, cu atât mai aproape de aceea de echilibru cu cât viteza de circulație este mai redusă, respectiv cu cât roca colectoare prezintă un «grad de deschidere hidrogeologic» mai redus.

Din acest punct de vedere se disting: *Zona 1*, de schimb liber, cu compoziție și cu condiții de formare corespunzătoare celor de suprafață, cu deosebirea că tipurile, grupele și subgrupele sînt mai bine individualizate, datorită circulației mai reduse. Ele cuprind, în ordinea frecvenței, tipurile I, III și II (v. tabela 33). Dintre acestea, în grupa I A predomină subgrupele «Ca» în rocile calcaroase; în cele dolomitice, cationul «Ca» este parțial (circa 30%) substituit prin «Mg», iar în rocile eruptive bazice ajunge să predomine «Mg», ca $Mg(HCO_3)_2$.

În grupa I B, în apele din roci de facies sulfato-dolomitic, predomină I B 1, subgrupele «Ca» și «Mg», în raporturi comparabile, iar în apele din roci de facies net sulfatice predomină I B 1 subgrupa «Ca».

În cazuri particulare, în roci eruptive metamorfice sau sedimentare conținînd sulfuri, iau naștere prin oxidare ape corespunzătoare unei clase particulare I B 3 (o clasă S_3 atît de rară, încît nu a fost inclusă în clasificarea generală) «alaunice» sau încărcate cu sulfat ai metalelor grele de origine *).

În grupa I C, întîlnită rar, intră ape generate numai prin drenarea rocilor de facies «sare gemă».

Apărent înrudit cu această grupă este tipul III, tot atît de rar, cuprinzînd în principiu toate clasele citate în tabele și provenite fie din spălarea rocilor cu facies «cloruri» sau «sulfato-cloruri» de proveniență marină, fie din roci de facies absolut oarecare, printr-un proces de reconcentrare înaintată.

Apele de tipul II din această zonă se caracterizează prin prezența $NaHCO_3$ și prin predominanța $Ca(HCO_3)_2$, proveniți din dezagregarea feldspaților și a feldspatoizilor de către apele agresive încărcate cu CO_2 atmosferic.

Zona 2, de schimb stînjenit cu suprafața, cu ape încă mai mineralizate, prin circulație și mai redusă și uneori chiar prin reconcentrare parțială prin antrenarea vaporilor de apă în hidrocarburi ușoare care

migrează prin roca respectivă, cu mineralizație corespunzătoare, mai individualizată și mai apropiată de aceea a rocii pe care o saturează. Cînd, însă, procesul de concentrare progresează mai mult, ele tind către un număr redus de tipuri de echilibru cu concentrație mare, influențat mai puțin de rocă decît de condițiile de oxidare-reducere. În mediul reducător, reducerea sulfatilor provoacă o îmbogățire relativă în ceilalți anioni, practic în $NaHCO_3$ în condiții mai de suprafață, respectiv în cloruri mai în adîncime. În condițiile, mai puțin frecvente, ale unui mediu oxidant, prin reacții de precipitare și prin schimb de cationi, ele tind către concentrarea în cloruri, astfel încît în ultimă fază apele acestei zone tind către un tip unic, bogat în cloruri.

Zona 3, de schimb nul cu suprafață, după un contact foarte lung, tinde către un tip caracteristic cu $CaCl_2$. Constatarea, mai mult experimentală, nu este deplin explicată (s-a propus explicația schimbului $NaCl \rightarrow MgCl_2 \rightarrow CaCl_2$), dar atît de verificată încît prezența $CaCl_2$ asigură originea de adîncime (zona de schimb nul) a acestei ape. Excepții foarte rare; unele ape superficiale care se găsesc în condiții particulare de totală absență a oricărui sulfat și de lipsă de comunicații (unele lacuri).

4. Reprezentarea simbolică sau sinoptică a mineralizației. Numărul mare de ioni prezenți face ca analiza chimică a compoziției mineralizației să nu fie direct interpretabilă. În general, fiecare dintre sistemele de clasificare propuse este însoțit de un sistem de reprezentare fie schematic (parametric), fie sinoptic (grafic).

Cele mai răspîndite sînt:

a) *Metoda salinității-alcălinității*, care folosește trei coloane paralele, cele două periferice divizate 0—50%, pentru anioni (stînga), respectiv cationi (dreapta), iar cea centrală, divizată 0—100%, pentru salinității-alcălinității (v. fig. 95) corespunzătoare apei analizate în tabela 32. Ea se construiește reportînd în coloana din stînga (A, în fig. 95) echivalenți în % ai anionilor, în ordinea: ρCl , ρSO_4 , ρNO_3 , ρCO_3 , ρHCO_3 , ρS și ρHS , iar în coloana din dreapta (B, în fig. 95) echivalenți în % ai cationilor în ordinea $\rho (Li + Na + K)$, ρMg , $\rho (Ca + Sr + Ba)$, și, eventual, cationi de metale grele.

Se calculează apoi și se reportează în coloana centrală (C, în fig. 95) valorile S_1 (de la 0% în sus) și A_2 (de la 100% în jos, în cazul frecvent $A_3 = S_3 = 0$), între ele rămînd A_1 , respectiv S_2 , după caz.

În cazul A_3 sau $S_3 = 0$ (numai una este posibilă) se reportează (de la 100% în jos) întîi A_3 și apoi A_2 , respectiv întîi S_3 și apoi A_1 sau S_2 (A_2 nefiind posibil în acest caz).

Pentru un operator experimentat, metoda este destul de expresivă însă greoaie, fiind totuși una dintre cele mai vechi și răspîndite.

* Această clasă 3 (S_3) ar urma să cuprindă subgrupe mult mai numeroase, după cationii sulfurilor de origine Fe, Cu, Pb, etc. și după cationii silicaților și ai carbonaților atacați de SO_4H_2 , provenit din oxidarea sulfurilor, «Ca», «Mg», «Na», «K», «Li», «Mn» etc.

b) Metoda Tickell folosește o reprezentare polară cu șase axe de coordonate (v. fig. 96) pe care se reportează $\rho(\text{Na} + \text{K})$, $\rho(\text{HCO}_3' + \text{CO}_3'')$, $\rho\text{SO}_4''$ și $\rho\text{CO}_3''$. Axa a șasea este nefolosită la analizele curente și este rezervată

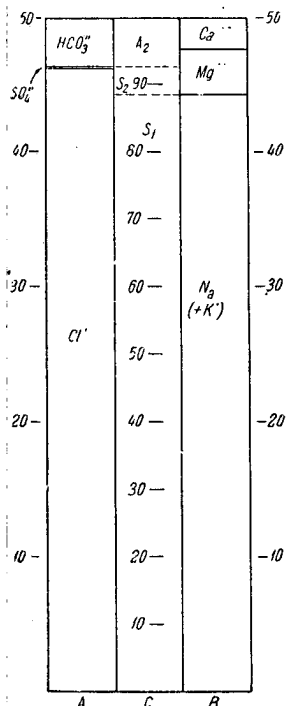


Fig. 95. Reprezentarea prin metoda "salinității-alcalinității", a mineralizării apei analizate în tabela 33.

nevoilor speciale de a se reprezenta uneori conținutul în unii ioni caracteristici. Cu tot caracterul ei sugestiv, ea este puțin folosită,

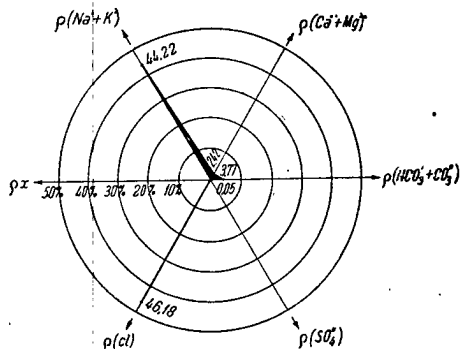


Fig. 96. Reprezentarea prin metoda Tickell, a mineralizării apei analizate în tabela 33.

datorită faptului că nu permite reprezentarea raporturilor $\rho\text{Ca}/\rho\text{Mg}$ și $\rho\text{HCO}_3'/\rho\text{CO}_3''$ și nu prezintă decît în mod mecanic conținutul mineralizației.

c) Metoda Tolstihin folosește o reprezentare a compoziției apei prin poziția unui punct în interiorul unui pătrat (v. fig. 97) pe ale cărui laturi sînt scările de coordonate $\rho(\text{HCO}_3' + \text{CO}_3'')$, $\rho(\text{Ca} + \text{Mg})$, $\rho(\text{SO}_4'' + \text{Cl}')$ și $\rho(\text{Na} + \text{K})$. Ea constituie un progres deoarece permite atît cunoașterea simultană a compoziției aproximative a apei cît și a for-

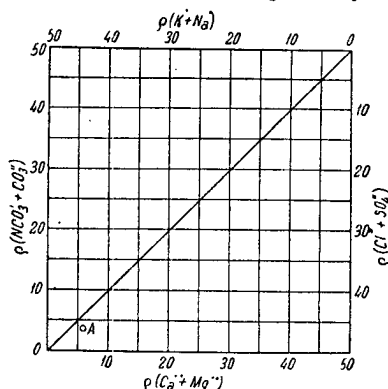


Fig. 97. Reprezentarea prin metoda Tolstihin, a mineralizării apei analizate în tabela 33.

mulei aproximative de salinitate-alcalinitate, însă prezintă dezavantajul că nu permite o exprimare globală a diferiților ioni (niciunul dintre anioni sau dintre cationi nu este exprimat individual și principalele dificultăți sînt provocate de necunoașterea raporturilor $\rho\text{Cl}'/\rho\text{SO}_4''$, $\rho\text{Ca}''/\rho\text{Mg}''$ și $\rho\text{HCO}_3'/\rho\text{CO}_3''$).

d) Metoda diagramei genetice a lui Sulin folosește două pătrate (în fig. 98), reprezentînd pe axa OA, $\rho\text{SO}_4''$, pe axa DOC, $\rho(\pm\text{Cl}' \pm \pm\text{Na}')$ și pe axa OF, $\rho\text{Mg}''$. Prin aceasta, compoziția apei este, practic, complet determinată; pentru necesități speciale se recurge la examinarea indicilor

$$\frac{\rho\text{Na}' - \rho\text{Cl}'}{\rho\text{SO}_4''}, \frac{\rho\text{Cl}' - \rho\text{Na}'}{\rho\text{Mg}''} \text{ și } \frac{\rho\text{Na}'}{\rho\text{Cl}'},$$

care, deși mai puțin evident (îndeosebi $\rho\text{Na}'/\rho\text{Cl}'$), reies totuși din diagramă.

Prin diagonala BOE, diagrama este divizată în patru cimpuri, corespunzătoare celor patru tipuri I...IV din clasificarea lui Sulin, SO_4Na_2 , NaHCO_3 , MgCl_2 și CaCl_2 . Împărțind fiecare dintre aceste triunghiuri, prin medianele lui, diagrama se găsește divizată în 24 cimpuri corespunzătoare compozițiilor respective (v. tabela 34) în care s-a notat:

$$\begin{aligned} B &= A_2 + S_1; \\ S_{1c} &= \text{fracțiunea NaCl din } S_1; \\ A_{2Ca} &= \text{fracțiunea Ca din } A_2; \\ S_{2Ca} &= \text{fracțiunea CaSO}_4 \text{ din } S_2; \\ B_1 &= S_{1c} + A_{2Ca}; \\ A_{2Mg} &= \text{fracțiunea Mg din } A_2; \end{aligned}$$

Tabela 34. Formula de salinitate-alkalinitate a compozițiilor mineralizației din cele 24 sub-cimpuri ale diagramei genetice a lui Sulin

Tipul I • Sulfat de Na •			Tipul II • Bicarbonat de Na •			Tipul III • Clorura de Mg •			Tipul IV • Clorura de Ca •		
Sub-cimpul	Triunghiul	Formula	Sub-cimpul	Triunghiul	Formula	Sub-cimpul	Triunghiul	Formula	Sub-cimpul	Triunghiul	Formula
I	RQO	$BS_{10}S_2$	VII	RSB	$S_{10}BA_1$	XIII	PWO	B_1MgClB_2	XIX	VTO	$B_1MgClCaCl$
II	OQG	BS_2S_{10}	VIII	BSY	$S_{10}A_1B$	XIV	OWV	B_1B_2MgCl	XX	OTL	$B_1CaClMgCl$
III	GQA	S_2BS_{10}	IX	YSC	$A_1S_{10}B$	XV	VWE	$MgClB_1B_2$	XXI	LTD	$CaClB_1MgCl$
IV	AQH	$S_2S_{10}B$	X	CSK	A_1BS_{10}	XVI	EWN	$MgClB_1B_2$	XXII	DTM	$CaClMgClB_1$
V	HQB	$S_{10}S_2B$	XI	KSO	BA_1S_{10}	XVII	NWF	B_2MgClB_1	XXIII	MTE	$MaClCaClB_1$
VI	BQR	$S_{10}B_1S_2$	XII	OSR	$BS_{10}A_1$	XVIII	EWP	B_2B_1MgCl	XXIV	ETV	$MgClB_1CaCl$

Observație. Formula este constituită din cele trei simboluri definite înainte, așezate în ordine descrescătoare (cantitativ).

S_2Mg = fracțiunea $MgSO_4$ din S_2 ;

$B_2 = A_2Mg + A_2Mg$;

$MgCl = \rho MgCl_2$;

$CaCl = \rho CaCl_2$.

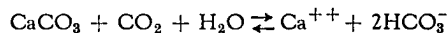
Singurele limitări în ce privește determinarea compoziției, din simpla examinare a diagramei, sînt ambiguitățile prezentate de subcimpurile I și II (ape în care pot predomina fie $NaCl$, fie bicarbonații de Mg sau Ca) sau tripla semnificație posibilă a subcimpurilor XVII și XVIII (ape în care pot predomina fie sulfatul fie carbonatul, fie bicarbonatul de magneziu) și XIII și XIV (ape în care pot predomina fie clorura de sodiu, fie sulfatul de calciu, fie bicarbonatul de calciu). Ele pot fi lămurite prin examinarea analizei și nu prezintă decît o importanță relativ redusă, îndeosebi ultimul caz.

Cu ajutorul acestei diagrame se pot lămurii probleme de corelare a apelor prin compararea compoziției mineralizației; probleme de clasificarea diferitelor sisteme acvifere după gradul de deschidere hidrogeologică (determinat în mare parte tot prin folosirea diagramei); probleme de corelare și de apartenență a unei ape la unul sau la altul dintre aceste sisteme, cum și probleme de pură hidrogeologie (determinarea ciclului de transformări pe care le-a suferit sau le suferă apa respectivă).

e) Metoda ing. Iordăchescu folosește o serie de coloane, câte una pentru fiecare ion considerat caracteristic, reprezentîndu-se în coloană în locul concentrației relative în echivalenți (ρ), cea absolută în mg/l echivalenți (γr). O apă anumită este astfel caracterizată prin cite un punct în fiecare dintre aceste coloane (centrul cercului respectiv, fig. 99). Notîndu-se lingă fiecare punct proveniența (formațiunea sau (și) sonda) și repetîndu-se operația pentru mai multe sonde dintr-o regiune dată, se obține o imagine sugestivă a provenienței apei și care este caracteristică fiecărui formațiuni geologice. La fiecare nouă analiză, modul de încadrare a punctelor reprezentative ale apei respective, în rețeaua generală indică, practic,

proveniența apei. Deși prezintă o utilitate incontestabilă pentru rezolvarea problemelor de identificare a provenienței apei (adeseori chiar ca mijloc geologic de corelare), metoda nu este suficient de răspîdită.

5. Componentii principali ai mineralizației apelor naturale. a) Calciul. Ionii de Ca prezenți în apele de suprafață, mai mult ca $CaSO_4$, sau în cele de adîncime, $CaCl_2$, efectuează un ciclu aproape permanent conform reacției:



între CO_2 și H_2O de origine atmosferică sau de adîncime, CO_3Ca din roci și din apele în curs de mineralizare, respectiv demineralizare, cu transport de $CaCO_3$ și de CO_2 .

El constituie, în principiu, cationul predominant în apele cu concentrație totală redusă, cedînd locul sodiului, în apele cu concentrare înaintată.

Determinarea cea mai frecventă o constituie precipitarea ca oxalat de Ca cu oxalat de amoniu (care se preferă celui de Na), urmată fie de o spălare ușoară și de cîntărire, fie, de preferință, de punere în libertate prin deplasarea cu H_2SO_4 a acidului oxalic, și prin titrarea acestuia cu permanganat de potasiu (GOST 3688-47).

b) Magneziul însoțește în general Ca de obicei în proporție (față de Ca) crescătoare cu concentrația totală, participînd și el la transferul prin bicarbonatare menționat la Ca .

Dozarea magneziului, relativ dificilă, se face fie prin metoda cu galben de titan (colorația în roșu prin precipitare Mg în soluție alcalină de galben de titan, comparată apoi colorimetric cu o serie de soluții cu conținut de Mg cunoscut tratate analog) GOST 3820-47, fie prin metoda cu oxichinoleină în soluție alcalină [$Mg(OH)_2$], care cuprinde: precipitarea Mg ca oxichinoleat de Mg , filtrarea și recuperarea cantitativă a oxichinoleinei prin tratarea oxichinoleatului cu un acid, urmată de dozarea acesteia prin tratare cu amestec bromură-bromat în cantitate cunoscută excedentară și dozarea excesului de brom pe cale iodometrică

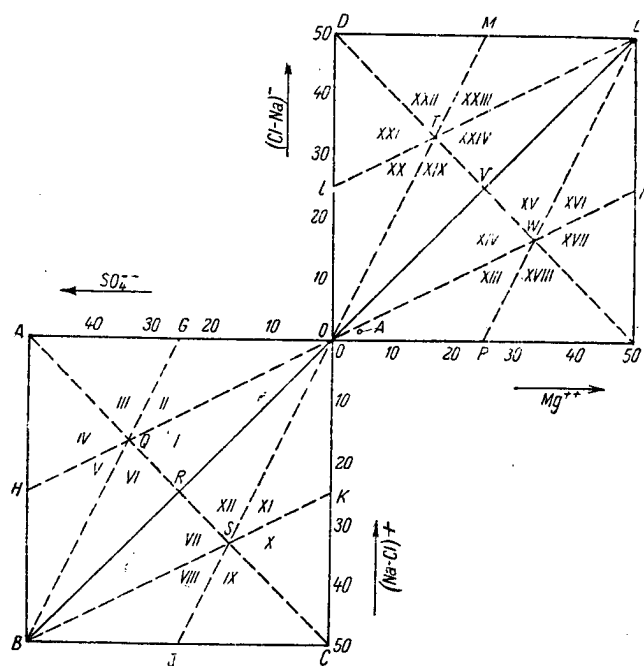


Figure 1 consists of seven vertical bar charts, each representing a different element: Na, Cl, Ca, Mg, SO₄, CO₂ + CO₂H, and Total. The y-axis for all charts represents concentration in g/l, with major ticks at 1000, 2000, 3000, and 4000. The x-axis represents isotopic stages, with labels 2, 4, 6, and 8. The legend indicates three isotopic stages: Drader (dashed circle), Meotian I (solid circle with a dot), and Meotian II (solid circle). The data points are as follows:

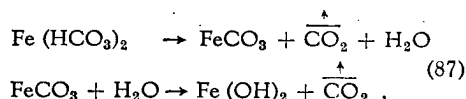
Element	Stage	Isotope	Concentration (g/l)
Na	Meotian II	107	~3800
		119	~3500
		125	~3200
	Meotian I	225	~2500
		33	~1000
	Drader	16, 52	~1000
Cl	Meotian II	107	~3800
		119	~3500
		125	~3200
	Meotian I	225	~2500
		33	~1000
	Drader	16, 52	~1000
Ca	Meotian II	107	~3800
		119	~3500
		125	~3200
	Meotian I	225	~2500
		33	~1000
	Drader	16, 52	~1000
Mg	Meotian II	107	~3800
		119	~3500
		125	~3200
	Meotian I	225	~2500
		33	~1000
	Drader	16, 52	~1000
SO ₄	Meotian II	107	~3800
		119	~3500
		125	~3200
	Meotian I	225	~2500
		33	~1000
	Drader	16, 52	~1000
CO ₂ + CO ₂ H	Meotian II	107	~3800
		119	~3500
		125	~3200
	Meotian I	225	~2500
		33	~1000
	Drader	16, 52	~1000
Total	Meotian II	107	~3800
		119	~3500
		125	~3200
	Meotian I	225	~2500
		33	~1000
	Drader	16, 52	~1000

Fig. 99. Reprezentarea compoziției mineralizației apelor pentru corelare, după metoda, ing. Iordăchescu

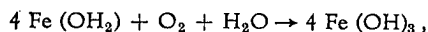
(colorimetrie) prin cantitatea de sulfat necesară decolorării iodului pus în libertate de brom.

Din cauza complicației, se preferă însă metoda recoltării filtratului de la precipitarea Ca și precipitarea din acest filtrat a magneziului ca fosfat complex de amoniu-magneziu, care, după înlăturarea amoniului prin calcinare, permite dozarea Mg prin cântărirea pirofosfatului de Mg rezultat din calcinare.

c) *Fierul* se poate găsi în ape fie sub formă ionică, în soluție ca Fe^{++} sau Fe^{+++} fie sub formă de suspensie propriu-zisă sau coloidală a oxizilor hidratați. În apele de oarecare adâncime, sub presiune, se găsește deseori bicarbonatul feros, care, însă, la ieșirea apei la zi se descompune și hidrolizează:



iar hidratul feros se oxidează în condițiile atmosferice destul de repede, conform reacției



dând un precipitat de hidrat feric. În apele de mlaștini sau de turbărie sau în apele din bazinele industriale, fierul se poate găsi în soluție sub forma de humăți sau de săruri corespunzătoare apelor acide industriale eliminate. Anionii humici prezenți în apele de mlaștini sau de turbărie exercită o acțiune de protecție a hidratului feric coloidal și formează cu fierul compuși complecși, îngreunând astfel mult tratarea apei pentru eliminarea fierului.

La formarea hidratului feric prin oxidarea celui feros, se obține o gamă de stări de dispersie, de la soluții propriu zise, la soluri, până la precipitarea de geluri și floclare, însoțite de colorații caracteristice. De la transparența soluției de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ se trece la o ușoară opalescență (în concentrații mici, 2–3 mg/l), până la culori galbene-brun roșcat.

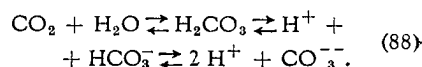
Dozarea cea mai răspândită se efectuează sub forma de sulfocianură ferică din soluții ferice acide, prin adaos de sulfocianură (rodanură) de K sau NH_4 . Pentru evitarea pierderilor se recomandă oxidarea prealabilă a Fe^{++} în Fe^{+++} cu ajutorul unui oxidant (persulfat de amoniu, perhidrol etc.).

d) *Sodiul și potasiul*, cu comportarea și cu frecvența menționate, se dozează greu pe cale directă; de aceea se preferă deseori determinarea indirectă prin diferența dintre suma cationilor, respectiv a anionilor în apele neutre sau neutralizate și suma ($\text{Ca} + \text{Mg}$), în cazul lipsei altor cationi.

Determinarea directă este acceptabilă numai în cazul când raportul dintre ρ ($\text{Na} + \text{K}$) și suma echivalenților în % a celorlalți cationi este mare. Chiar și în acest caz se recomandă o analiză calitativă cât mai completă a cationilor. În cazul contrar, se recurge la determinarea cantitativă directă (practic numai a sodiu-

lui) prin precipitarea Na ca zincuranilacetat de sodiu $(\text{UO}_2)_2\text{ZnNa}(\text{CH}_3\text{COO})_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Precipitarea potasiului cu nitrocobaltat de sodiu, ca $\text{K}_3[\text{Co}(\text{NO}_2)_6]$, urmată de dozarea cantității de permanganat de potasiu consumat pentru decolorare, permite dozarea eventuală a potasiului.

e) *Acidul carbonic liber, anionii carbonat și hidro(bi)-carbonat*. Afară de CO_2 dizolvat în apă, numit CO_2 «liber», și de molecule H_2CO_3 nedisociate, ionii HCO_3^- caracterizează așa numitul CO_2 «semilegat», iar ionii CO_3^{--} , așa numitul CO_2 «legat». Tranziția se efectuează conform



Prin îndepărtarea de CO_2 liber, echilibrul se deplasează de la dreapta la stînga, pentru refacerea concentrației de echilibru $[\text{CO}_2]$ și invers.

Dacă se exprimă legea acțiunii maselor [v. (73)] sub o formă mai exactă, înlocuindu-se *) concentrațiile în ioni i , $[i]$, prin activitățile corespunzătoare exprimate prin produsul $f_i[i^\pm]$

în care:

f_i este coeficientul de activitate al ionului i ;
 $[i^\pm]$ — concentrația molară în ion i a soluției;

atunci reacției II din (88) îi corespunde ecuația de echilibru

$$\frac{f_{\text{H}}[\text{H}^+]}{f_{\text{H}_2\text{CO}_3}} \frac{f_{\text{HCO}_3^-}[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = K_1, \quad (89)$$

iar reacției III din (88) îi corespunde ecuația de echilibru

$$\frac{f_{\text{H}}[\text{H}^+]}{f_{\text{HCO}_3^-}[\text{HCO}_3^-]} \frac{[\text{CO}_3^{--}]}{[\text{HCO}_3^-]} = K_2. \quad (90)$$

Coeficienții K_1 și K_2 , așa numitele constante de echilibru pentru gradul I, respectiv II de disociere, au valorile date în tabela 35.

Concentrația moleculelor de H_2CO_3 disociate este de circa 0,1% din concentrația molară a CO_2 dizolvat, astfel încît se poate, practic, considera că numitorul părții stîngi a ecuației primului grad de disociere (89) este constituit integral din concentrația molară a CO_2 dizolvat, care poate fi considerată și ca o concentrație în CO_2 liber. Din aceeași ecuație rezultă că concentrația molară a diferitelor forme ale acidului carbonic (CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{--}) depinde, la o anumită temperatură, de $f_{\text{H}}[\text{H}^+]$ deci, de pH. Pentru temperatura de + 25 °C, această dependență este exprimată de fig. 100. Unei anumite concentrații de ioni

*) În cazul moleculelor disociate în ioni.

Tabela 35. Valorile constantelor de disociere ale acidului carbonic K_1 și K_2

Temperatura, °C	0	10	20	25	30
K_1	$2,61 \cdot 10^{-7}$	$3,34 \cdot 10^{-7}$	$4,05 \cdot 10^{-7}$	$4,31 \cdot 10^{-7}$	$4,52 \cdot 10^{-7}$
K_2	$2,36 \cdot 10^{-11}$	$3,24 \cdot 10^{-11}$	$4,20 \cdot 10^{-11}$	$4,69 \cdot 10^{-11}$	$5,13 \cdot 10^{-11}$
Temperatura, °C	40	50	60	70	80
K_1	$(4,85 \cdot 10^{-7})$	$(5,05 \cdot 10^{-7})$	$(5,08 \cdot 10^{-7})$	$(5,00 \cdot 10^{-7})$	$(4,84 \cdot 10^{-7})$
K_2	$6,03 \cdot 10^{-11}$	$6,73 \cdot 10^{-11}$	$(7,20 \cdot 10^{-11})$	$(7,51 \cdot 10^{-11})$	$(7,55 \cdot 10^{-11})$

Observație: Valorile înecrate în paranteze sînt obținute prin calcul (extrapolare)

HCO_3^-) întreținute în soluție, îi corespunde o anumită concentrație de CO_2 liber, « de echilibru ». Dacă concentrația efectivă a soluției în CO_2 liber este mai mare decît cea de echilibru, excesul de CO_2 va fi folosit de soluție pentru dizolvarea de CO_3Ca . O astfel de apă

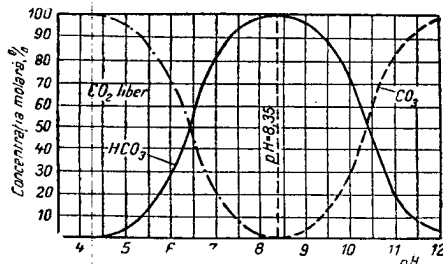
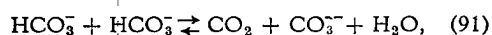


Fig. 100. Relația dintre pH-ul apei și concentrațiile de echilibru ale diferitelor forme de acid carbonic (CO_2 , HCO_3^- și CO_3^{2-}).

are o acțiune « agresivă » asupra rocilor și asupra construcțiilor cu mortar de var sau de beton. Dacă, dimpotrivă, concentrația efectivă în CO_2 liber este inferioară celei « de echilibru », pentru a o readuce la cea de echilibru, soluția își va descompune bicarbonatul de calciu din care sustrage CO_2 necesar atingerii concentrației de echilibru, precipitând produsul secundar al descompunerii, CO_3Ca . Acest fenomen, condus în mod adecvat, este folosit ca una dintre cele mai eficiente și mai ieftine metode de protecție contra corodării conductelor de oțel pentru apa de injecție în zăcămint.

Această descompunere, care alimentează cu CO_2 soluția pentru a reface concentrația de echilibru, se supune și ea legii acțiunii maselor,



prezentînd o constantă de echilibru K_e , conform ecuației

$$\frac{f_{\text{HCO}_3^-} [\text{HCO}_3^-] \cdot f_{\text{HCO}_3^-} [\text{HCO}_3^-]}{f_{\text{CO}_2} [\text{CO}_2] \cdot [\text{CO}_3^{2-}]} = K_e \quad (92)$$

Dacă se compară ecuația (92) cu ecuația (93) rezultată din ecuațiile (89) și (90), ținînd seama că $[\text{H}_2\text{CO}_3] \approx [\text{CO}_2]$, se obține $K_e = K_1/K_2$. Deoarece, în marea majoritate a apelor naturale, cationul principal legat de acidul carbonic este calciul, se poate considera că produsul activităților Ca^{++} și CO_3^{2-} este egal cu produsul de solubilitate al CO_3Ca

$$f_{\text{Ca}} [\text{Ca}^{++}] \cdot f_{\text{CO}_3} [\text{CO}_3^{2-}] = S_{\text{CaCO}_3} \quad (93)$$

astfel încît

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{f_{\text{HCO}_3^-}^2 [\text{HCO}_3^-]^2}{\frac{S_{\text{CaCO}_3}}{f_{\text{Ca}} [\text{Ca}^{++}]} \cdot [\text{CO}_2]} \quad (94)$$

și

$$\begin{aligned} \lg [\text{CO}_2] = & -\lg K_2 + \lg K_2 - \lg S_{\text{CaCO}_3} + \\ & + 2 \lg [\text{HCO}_3^-] + \\ & + \lg [\text{Ca}^{++}] + 2 \lg f_{\text{HCO}_3^-} + \lg f_{\text{CO}_3^-}. \end{aligned} \quad (95)$$

sau, ținînd seama de faptul că la soluții atît de diluate ca apele naturale, se poate lua: $\lg f = -0,5 \cdot Z^2 \cdot \sqrt{\mu}$, unde Z este valența ionului respectiv și $\mu = 0,00022 P$, P fiind mineralizația totală a apei în mg/l (cit timp $P < 2300$ mg/l) și notînd (prin generalizarea notației pH), $px = -\lg x$, se obține:

$$\begin{aligned} \lg [\text{CO}_2] = & pK_1 - pK_2 + pS_{\text{CaCO}_3} + \\ & 2 \lg [\text{HCO}_3^-] + \lg [\text{Ca}^{++}] - 3 \sqrt{\mu} \end{aligned} \quad (96)$$

În practică, măsurîndu-se concentrațiile nu în valorile unitare notate în ecuația (94) cu [], ci în mg/l, respectiv în grade,

$$\begin{aligned} \lg (\text{CO}_2) = & pK_1 - pK_2 + pS_{\text{CaCO}_3} + \\ & + 2 \lg (\text{HCO}_3^-) + \lg (\text{Ca}^{++}) + \\ & + 3 \sqrt{\mu} - 6,85 \end{aligned} \quad (97)$$

unde:

(CO_2) este concentrația în CO_2 , în mg/l;
 (Ca^{++}) — concentrația în Ca^{++} , în mg/l;

Tabela 36. Valori ale logaritmilor inverselor constantelor de echilibru, din ecuațiile de primul și al doilea grad de disociere a acidului carbonic (v. ec. 89 și 90) și ale logaritmului inversului produsului de solubilitate al carbonatului de Ca

t°, C	0	10	20	25	30	40	50	60	70	80
pK_1	6,58	6,48	6,39	6,37	6,34	(6,31)	(6,30)	(6,29)	(6,30)	(6,31)
pK_2	10,63	10,49	10,38	10,33	10,29	10,22	10,17	(10,14)	(10,13)	(10,12)
pS_{CaCO_3}	8,02	8,15	8,28	8,34	8,39	(8,51)	(8,62)	(8,74)	(8,86)	(8,97)

Observații: Valorile din paranteze nu sînt deduse experimental ci prin calcul (extrapolare).

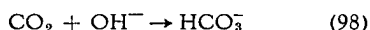
(HCO_3^-) — concentrația în HCO_3^- (alcalinitatea), în grade (centigrade */litru), iar valorile pK_1 , pK_2 și pS_{CO_3Ca} , funcțiuni de temperatură, sînt cele date în tabela 36.

Pentru cazul concentrației totale în săruri, mai mari decît 2 300 mg/l, în loc de $-3 \sqrt{\mu}$ se iau valorile efective ale coeficienților de activitate f_i din tabela 37.

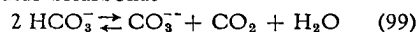
Tabela 37. Valorile aproximative ale coeficienților de activitate f_i în funcție de potențialul ionic « μ »

μ	0,00	0,005	0,01	0,05	0,1
Pentru ioni mono-valenți	1,00	0,95	0,93	0,85	0,80
Pentru ioni bivalenți	1,00	0,80	0,74	0,56	0,46
Pentru ioni trivalenți	1,00	0,62	0,52	0,28	0,20

Determinarea directă a conținutului în acid carbonic liber se poate face prin titrarea cu soluție alcalină de molaritate cunoscută, pînă la neutralizarea acestuia, identificată prin virajul fenolftaleinei de la incolor (pH < 8,3...8,4) la roșu vișiniu (pH > 8,3...8,4) v. și fig. 99, prin reacția



Exactitatea metodei nu este satisfăcătoare la concentrații mari de HCO_3^- . Prin titrarea cu soluție alcalină, OH^- se tulbură și echilibrul sistemului bicarbonat



prin aceea că HCO_3^- format prin reacția (98) influențează reacția (99) către dreapta, eliberîndu-se CO_2 liber, care absoarbe o nouă cantitate de soluție alcalină, ceea ce sporește eronat alcalinitatea titrată.

Descompunerea bicarbonaților (99) este detectată de formarea unei tulbureli (suspensie și precipitare de carbonați), îndeosebi la temperaturi mai înalte, la viteze de titrare foarte mici și la un conținut mare în bicarbonați (peste 12...14°). Din această cauză, este preferabilă determinarea indirectă cu ajutorul pH-ului și al alcalinității totale.

În gama uzuală a apelor naturale, pH > 5 și se poate lua cu suficientă aproximație

$$(CO_2) = \frac{15,7 (HCO_3^-)}{K_1 \cdot 10^{pH} + \sqrt{\mu}} \quad (100)$$

-cu notațiile din reacția (99).

*) CaO, echivalent.

Pentru determinarea grafică, în abaca reprezentată în fig. 101, construită pentru $t^{\circ} = 25^{\circ}C$ și $P = 20$ mg/l, se reportează pe axa din dreapta alcalinitatea totală, pe cea oblică,

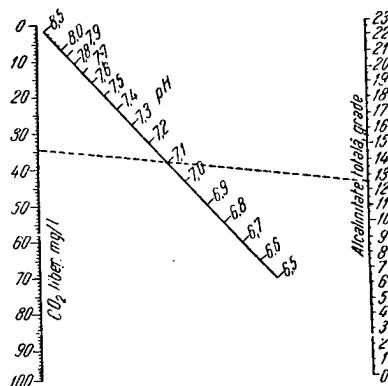


Fig. 101. Abaca pentru determinarea conținutului în CO_2 liber, pe baza alcalinității totale și a concentrației în ioni de hidrogen a soluției.

pH-ul soluției și în prelungirea dreptei determinate de aceste două puncte se citește, pe axa din stînga, concentrația CO_2 , în mg/l.

Pentru alte temperaturi și pentru alte mineralizații (P), concentrația în CO_2 , obținută cu ajutorul abacei (fig. 101), trebuie corectată prin multiplicarea cu un coeficient de corecție pentru temperatură, notat cu α și determinat astfel:

$$\alpha = \frac{K_1^{(t^{\circ}=25^{\circ})}}{K_1^t} \quad (101)$$

unde $K_1^{(t^{\circ}=25^{\circ})}$ este constanta de echilibru la 25° a ecuației de disociere în primul grad;

K_1^t — constanta de echilibru la t° a ecuației de disociere în primul grad (v. și tabela 38) respectiv cu un coeficient de corecție pentru mineralizație, β (v. tabela 39).

Tabela 38. Coeficienții de corecție pentru temperatura diferită de 25° , a conținutului de CO_2 liber determinat cu ajutorul abacei din fig. 100

t°	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
α	1,65	1,44	1,29	1,16	1,06	1,00	0,95

Tabela 39. Coeficienții de corecție pentru mineralizație diferită de $P = 20$ mg/l, a conținutului de CO_2 liber determinat cu abaca din fig. 100

Mineralizație (aproximativ egală cu reziduul de evaporare)	20	50	100	200	300	400	500
β	1,00	0,97	0,94	0,90	0,88	0,86	0,84

f) Alcalinitatea. Deși alcalinitatea totală ($A_t = A_c + A_b + A_h$) cuprinde totalitatea cationilor liberi sau legați cu anioni care pot fi deplasați de Cl^- , pentru imensa majoritate a apelor dulci naturale cu pH -ul $< 8,3 \dots 8,4$, constituită de cationii legați cu HCO_3^- , definiția alcalinității totale este restrinsă la totalitatea ionilor liberi sau legați cu una dintre cele două forme ale acidului carbonic. Această alcalinitate totală este suma a trei alcalinități: alcalinitatea cationilor liberi, A_h , alcalinitatea bicarbonică, A_b , alcalinitatea carbonică, A_c , sau, exprimând toate alcalinitățile fie în mg echivalenți/l, fie în grade (centigrade/l),

$$A_t = A_c + A_b + A_h. \quad (102)$$

Determinarea lor se face prin titrarea soluției de HCl , $\text{N}/100$, până la virajul indicatorului. Virajul fenolftaleinei, de la roșu (alcalin) la incolor (acid), are loc în intervalul $8,3 \text{ pH} < 8,4$, iar indicatorul metiloranj, virează de la galben-portocaliu ($\text{pH} > 4,0$) la roșu ($\text{pH} < 3,7$).

Din diagrama reprezentată în fig. 100 rezultă că la $\text{pH} < 4,0$, practic, tot CO_2 este trecut în stare liberă, soluția fiind liberă de anioni HCO_3^- și cu atât mai mult de CO_2 . Cantitatea totală de acid consumată până la virajul metiloranjului (inclusiv cea consumată până la virajul fenolftaleinei), exprimată în mg echivalenți/l sau în grade (centigrade echivalent CaO/l) este numită alcalinitate totală, A_t . Dacă se notează cu F cantitatea (exprimată în aceleași unități) de acid consumat până la virajul fenolftaleinei, în cazul cînd $2F < A_t$, componenții

lui A_t pot fi determinați numai pe baza titrărilor. Dacă $2F > A_t$, componenții trebuie determinați prin calcul, folosind valorile pH și A_t (v. schema dată în tabela 40).

Formulele pentru calculul alcalinităților parțiale A_c , A_b și A_h , deduse prin rezolvarea sistemului de ecuații de echilibru de disociere a acidului carbonic (gradul I și II), a apei și de echilibru electric al soluțiilor neutre care conțin anioni ai acidului carbonic, sînt:

$$A_c = \frac{K_2 \cdot 10^{2\sqrt{\mu}} \cdot 0,000357 A_t + 10^{-\text{pH}} - K_{apd} \cdot 10^{\text{pH} + \sqrt{\mu}}}{0,0001785 (10^{-\text{pH}} + 2 K_2 \cdot 10^{2\sqrt{\mu}})} \quad (103)$$

$$A_b = \frac{0,000257 A_t + 10^{-\text{pH}} - K_{apd} \cdot 10^{\text{pH} + \sqrt{\mu}}}{0,000357 (1 + 2 K_2 \cdot 10^{\text{pH} + 2\sqrt{\mu}})} \quad (104)$$

$$A_h = 2800 K_{apd} \cdot 10^{\text{pH} + \sqrt{\mu}} \quad (105)$$

în care, pentru K_2 , v. tabela 36; pentru K_{apd} , v. tabela 16; $\mu = 0,000022 P$ cu P = mineralizația totală, mg/l, cît timp $P < 2300$ mg/l.

Tabela 40. Schema de determinare a componenților alcalinității apei

Date de analiză alcalinitatea totală și alcalinitatea la fenolftaleină	pH	Alcalinitățile componente de determinat		
		A_c	A_b	A_h
$F = 0$ $2F < A_t$ $2F \geq A_t$	$< 8,4$ $\leq 9,5$ $> 9,5$	0 $A_c = 2F$ se calculează cu ecuațiile 103, 104 și 105 sau cu abacole date în fig. 101	$A_b = A_t$ $A_b = A_t - 2F$	0 $A_h < 0,1^\circ$

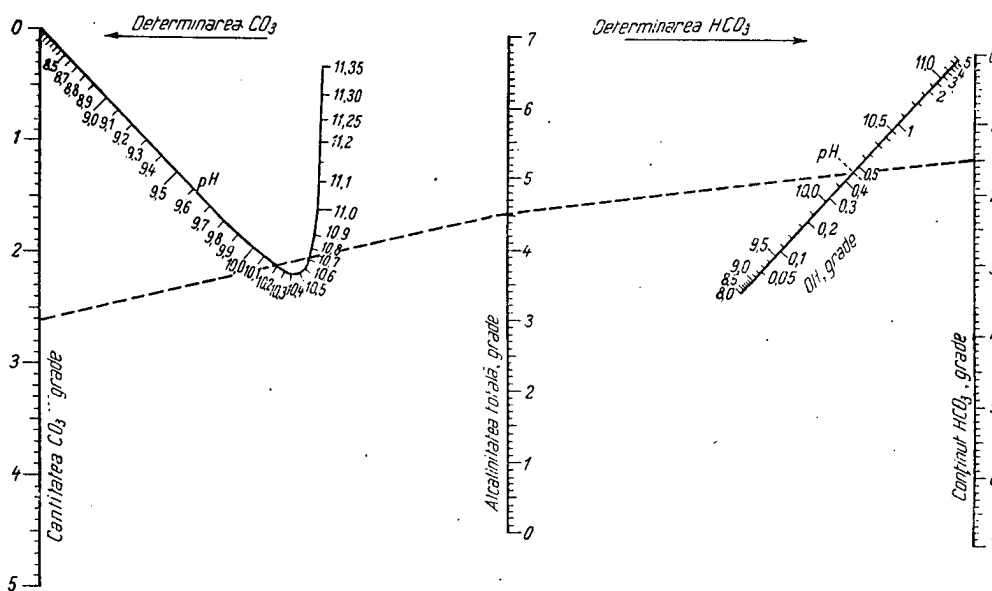
Din cauza dificultății de calcul, pentru operațiile curente, A_c , A_b și A_h se determină cu abacole date în fig. 102, construite pentru $t^\circ = 25^\circ$ și $P = 20$ mg/l.

Pentru ape cu alt grad de mineralizație P , este necesar să se corecteze valorile A_c , A_b și A_h prin multiplicare cu cîte un factor de corecție, respectiv δ , γ , η ale căror valori sînt date în tabelele 41 și 42.

g) Clorul se găsește în apele naturale în concentrație de $0-200$ mg Cl^-/l (v. solubilitatea clorurilor, în tabela 43). În Marea Neagră, el atinge la suprafață $10-10,5$ g Cl^-/kg apă. El este cationul practic total al majorității apelor

Tabela 41. Coeficienții γ (pentru A_b) și δ (pentru A_c) de corecție pentru mineralizație $P \neq 20$ mg/l Pentru scopul propus, P = reziduul de uscare

pH	Re z i d u u d e u s c a r e											
	50		100		200		300		400		500	
	γ	δ	γ	δ	γ	δ	γ	δ	γ	δ	γ	δ
8	1,00	1,04	1,00	1,11	1,00	1,20	1,00	1,28	1,00	1,34	1,00	1,39
9	0,99	1,04	0,99	1,09	0,98	1,18	0,97	1,24	0,97	1,30	0,96	1,34
10	0,98	1,02	0,95	1,05	0,90	1,09	0,87	1,12	0,85	1,14	0,83	1,16
11	0,96	1,00	0,91	1,00	0,84	1,01	0,80	1,02	0,76	1,02	0,73	1,02

Fig. 102. Abaca pentru determinarea componentelor alcalinității apei, la 25 °C și la $P = 20$ mg/l.

din zăcămintele de țiței și de gaze. Trebuie observat că prezența clorurilor în concentrații mari în apele de zăcămintă provoacă sporirea solubilității aparente a sulfatilor greu solubili, prin influența exercitată asupra coeficienților de activitate (v. și tabela 37).

Determinarea clorurilor se face practic numai prin precipitarea Cl' cu AgCl , cu soluție de AgNO_3 N/10 (1,69888 g/l) sau N/100 (16,9888 g/l), în prezența KCrO_4 ca indicator, care, prin virajul de la galben foarte palid la roșu vișiniu intens (formare de AgCrO_4), indică epuizarea ionilor de Cl' . În practică se includ în Cl' și ionii Br' și I' care, de altfel, sînt prezenți în cantități mult mai mici.

O importanță deosebită în comportarea apelor injectate în strat au urmele de SrCl_2 și de BaCl_2 , care, deși foarte rare în apele de zăcămintă, pot să dea, la contactul cu apa dulce de suprafață purtînd anioni SO_4^{--} , un precipitat de sulfat respectiv, foarte vătămător receptivității stratului. Detecția clorurilor de Sr și de Ba se face turbidimetric sau după decantare la cald și după filtrarea apei de analizat, căreia i s-au adăugat în prealabil circa 10% — din volumul ei — soluție N/100 de NH_4SO_4 .

Tabela 42. Coeficientul η , de corecția A_h pentru mineralizație $P \neq 20$ mg/l. Pentru scopul propus, $P \approx$ reziduu de uscare

Reziduu de uscare mg/l	50	100	200	300	400	500
η	1,03	1,06	1,10	1,13	1,16	1,19

Tabela 43. Solubilitatea clorurilor cationilor mai frecvenți în apele naturale, în % greutate din soluție

Temperatura °C	Li'	Na'	K'	Ca''	Mg''
0	69,2	35,6	28,15	60,3	53,0
10	74,5	35,7	31,30	65,0	53,5
20	8,28	35,85	34,35	104,5	54,25
30	—	36,05	37,30	113,0	55,3
40	90,4	36,32	40,30	128,1	57,5
50	—	36,72	43,10	132,3	59,7
60	100,0	37,05	45,60	136,8	60,7
70	—	37,50	48,30	—	—
80	113,0	38,05	51,10	147,0	65,9
90	—	38,70	53,40	—	—
100	153	39,20	56,20	159,0	72,7
108,6	—	—	58,40	—	—
108,7	—	39,7	—	—	—
116,7	—	—	—	—	85,6
175,5	—	—	—	297,0	—

Observații. Clorurile de Ca, Mg formînd sisteme complexe, solubilitățile lor se deosebesc de la fază la fază; în general, valorile indicate sînt cele maxime. Ele nu există în apele naturale, ci în soluțiile de răcire.

h) Sulfatii. Sulfatii se găsesc în apele naturale, în general, în primele faze de spălare a rocilor, ca Na_2SO_4 , sau în apele de drenaj ale faciesurilor gipsoase (ape selenitoase) (v. ciclul de mineralizare-demineralizare). Concentrația SO_4^{--} este limitată de solubilitatea CaSO_4 (v. fig. 103). Trebuie menționată particularitatea maximului de solubilitate între 30...50°, importantă în cazul injectării în zăcămintele de adîncime mai mare decît 2 000—2 500 m.

Dozarea cu BaCl_2 nu este recomandabilă, deoarece se pot introduce și alți cationi în $[\text{SO}_4^{--}]$ dacă nu se iau măsuri speciale, care prelungească însă analiza.

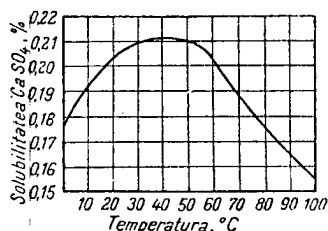
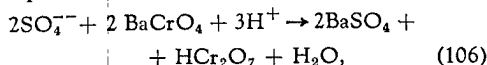
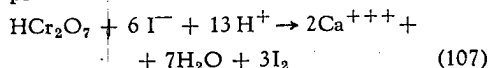


Fig. 103. Solubilitatea sulfatului de calciu în apă, în funcție de temperatură.

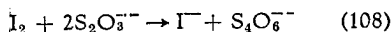
După GOST 1389-48, se recomandă precipitarea cu cromat de bariu în mediu acid:



iar acidul bicromic rezultat este dozat indirect prin tratare cu KI în mediu acid:



iodul fiind dozat prin consumul de N/10 tiosulfat de sodiu necesar decolorării:



i) *Duritatea apei* (*). Duritatea totală a apei este suma concentrațiilor în Ca și în Mg, exprimată în cg echivalenți CaO/l (scara de duritate germană). Un grad (1°dH) corespunde unei cantități de 10 mg CaO sau 7,15 mg Ca^{++} sau 4,34 mg Mg^{++} la un litru.

Duritatea totală se compune din duritatea carbonatică dH_c («temporară»), și duritatea necarbonatică, dH_n («permanentă»). Numele noi, deși mai puțin răspindite, sînt preferabile celor din paranteză, care nu exprimă exact conținutul noțiunii. Duritatea carbonatică cuprinde teoretic carbonații și bicarbonații, practic numai bicarbonații de Ca și de Mg. Duritatea necarbonatică cuprinde practic sulfatii și clorurile de Ca și de Mg.

Uneori, duritatea totală este analizată și ca $dH = dH_{\text{Ca}} + dH_{\text{Mg}}$. Deoarece la marea majoritatea apelor naturale, la $\text{pH} < 8,3 \dots 8,4$, duritatea carbonatică este determinată de $[\text{HCO}_3^-]$, ea este considerată egală cu alcalinitatea totală și determinată prin titrare cu HCl, în prezență de metiloranj + indigocarmin. Dacă se dau $[\text{Ca}^{++}]$, $[\text{Mg}^{++}]$ și $[\text{HCO}_3^-]$,

în mg/l, se poate calcula duritatea astfel:

$$\left. \begin{aligned} dH^\circ &= \frac{[\text{Ca}^{++}]}{7,15} + \frac{[\text{Mg}^{++}]}{4,34}; \\ dH_c^\circ &= \frac{[\text{HCO}_3^-]}{21,76}; \\ dH_n^\circ &= dH^\circ - dH_c^\circ; \\ dH_{\text{Ca}}^\circ &= \frac{[\text{Ca}^{++}]}{7,15}; \\ dH_{\text{Mg}}^\circ &= \frac{[\text{Mg}^{++}]}{4,34} \end{aligned} \right\} \quad (109)$$

Determinarea rapidă a durității totale se mai poate face prin dozarea cantității de soluție N/10 de palmitat de potasiu ($\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOK}$), necesară precipitării Ca^{++} și a Mg^{++} , sub formă de săpunuri insolubile.

Sfîrșitul reacției poate fi determinat fie prin formarea unei spume stabile (mai puțin sensibil), fie prin colorația roză a soluției, careia i s-au adăugat, în prealabil, cîteva picături de fenolftaleină, GOST 4151-48.

j) *Oxidabilitatea*. Apele naturale prezintă totdeauna o oarecare capacitate de absorbție petru oxigen. O parte din acesta este absorbit pur fizic, prin dizolvare, iar alta, chimic, pentru oxidarea substanțelor neorganice și a celor organice. În general, oxidabilitatea apelor de suprafață crește în regiunile cu populație densă, datorită poluării cu produse biologice; în regiunile de mlaștini, de turbării și de soluri bogate în acizi humici sau în humai, prin spălarea acestora. La apele subterane, ea crește într-o anumită măsură cu adîncimea, prin epuizare în contact cu rocile. Apele superficiale se găsesc într-un permanent schimb de oxidare-reducere, al cărui bilanț de echilibru este determinat de viteza de alimentare cu oxigen, respectiv substanță reducătoare. De asemenea, o activitate reducătoare este conferită multor ape subterane de prezența hidrocarburilor și a unor ioni ca Fe^{++} , Mn^{++} , NO_2^- , HS^- sau chiar H_2S liber.

Capacitatea reducătoare (oxidabilitatea) a apei se determină global, prin cantitatea totală de oxigen absorbit. Practic, ea se determină prin reducerea permanganatului de K (decolorare, de la roșu-violet la galben-brun slab, eventual precipitat brun) și se exprimă în miligrame $\text{K}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$ consumat la un litru de apă sau în cantitatea de oxigen corespunzătoare mg/l (mai rar).

6. *Caracteristicile generale ale apelor naturale*. a) *Apele marine* de mări deschise și de oceane au o salinitate de ordinul 35 g/l, constituită în majoritatea din NaCl și variabilă cu gradul de deschidere care determină împreună cu factorii hidrologici (aport de apă dulce din fluvii) și meteorologici (bilanț precipitație-evaporare), concentrația de echilibru.

*) În Franța și în S.U.A., duritatea apei se măsoară prin conținutul în CaCO_3 (un grad francez = 10 mg CaCO_3/l , respectiv 1 ppm = 1 mg CaCO_3/l). În Marea Britanie, duritatea apei se măsoară în grade engleze corespunzătoare la 10 mg $\text{CaCO}_3/0,71$ sau $\sim 14,3$ mg CaCO_3/l .

Activitatea ionilor de hidrogen, deosebit de constantă, datorită concentrației mici în CO_2 , este cuprinsă practic totdeauna între $8,1 < \text{pH} < 8,4$.

În mările închise, însă, caracteristicile apei sint mult mai variate, ele depinzând de condițiile locale și prezentând numeroase particularități, de exemplu, conținutul în H_2S al păturilor mai adânci din Marea Neagră.

b) *Apele «dulci» de uscat*, ale râurilor, ale lacurilor și cursurilor de apă subterană, se caracterizează printr-o mineralizație redusă (în general, sub 1 000 mg/l). Cele ale râurilor au, în general, sub 500 mg/l, cu excepția regiunilor cu climat secetos sau torid. Ionii caracteristici sint Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{--} și Cl^- .

În apele cu mineralizație cea mai redusă predomină Ca^{++} și HCO_3^- . Conținutul în oxigen este variabil, concentrația de echilibru dinamic fiind determinată de o serie de factori favorizanți (suprafață mare, stare de agitație, temperatură joasă) sau defavorizanți (substanțe reducătoare, în majoritate organice, temperatură înaltă etc.). Activitatea ionilor de hidrogen, variată în special din cauza variației conținutului de CO_2 , oscilează pentru apa de riuri între $\text{pH} = 6,5-8,5$.

c) *Apele de zăcămint* (țitei și gaze), cu toată variabilitatea lor, se pot grupa în două tipuri: 1) *ape dure* (caracteristică dată de CaCl_2); și 2) *alcaline* (caracteristică dată de bicarbonați). În oarecare măsură, apele de tipul (1) sint ape de adâncime relativ mare, pe cînd cele de tip (2), de adâncime relativ mică. Mineralizația este constituită, în ordinea importanței, de: Cl^- , Na^+ , Ca^{++} (la ape de adâncime), Mg^{++} , HCO_3^- și CO_3^{--} . O deosebită importanță practică are faptul că deseori apele care conțin CaCl_2 conțin și Fe^{++} în concentrații pînă la 200–300 mg/l, ceea ce poate provoca accidente grave la injectarea lor în zăcămint după oxidarea la suprafață, neînsoțită de o eliminare completă a Fe. Conținutul în Fe al acestor ape este atribuit, în general, nu zăcămintului, ci instalației, datorită agresivității acestor ape. O caracteristică a apelor de zăcămint o constituie prezența în soluție a hidrocarburilor ușoare și chiar a celor grele (v. fig. 159) sau în suspensie a hidrocarburilor lichide, care se pot detecta prin fluorescență în lumina ultravioletă mult mai ușor decît prin analiza chimică. În cazul cantităților relativ mari, dozarea se face prin centrifugare în fiole special cu gît semicapilar sau capilar, pentru a se citi ușor volumele foarte mici.

Prezența hidrocarburilor în apa de strat prezintă o dublă însemnătate practică; 1) riscul reducerii receptivității sondelor de injecție și 2) indicația prezenței unui zăcămint. Din ultimul punct de vedere, apele pot prezenta o utilitate deosebită: caracteristicile CaCl_2 sau NaHCO_3 constituie puternice indicii de probabilitate, care, coroborate cu alți indici, justifică deseori

lucrări de valoare. Dintre aceștia (cei hidrologici) fac parte: salinitatea relativ mare în cazul apelor cu CaCl_2 (salinitatea redusă a acestor ape trebuie verificată că nu rezultă dintr-o analiză eronată sau dintr-o contaminare), absența sulfatilor și prezența microcomponentilor caracteristici. Prezența hidrogenului sulfurat, care rezultă, în general, din reducerea sulfatilor pe cale chimică sau pe cale biologică, constituie un indiciu indirect. În primul caz, oxidarea hidrocarburilor poate merge pînă la CO_2 , ceea ce generează o parte din HCO_3^- caracteristic acestor ape.

Este însă absolut necesar să se observe că absența sulfatilor în apele de petrol, deși foarte frecventă, nu constituie o condiție eliminativă. Se cunosc cazuri de existență a sulfatilor în apele de zăcămint, după cum se cunosc relativ numeroase cazuri de ape care, prin conservare neadecvată (oxidarea S^{--}), între recoltare și analiză, au prezentat SO_4^{--} ; alteori concentrația în SO_4^{--} este determinată de echilibrul dintre contaminarea și reducerea permanentă.

d) *Microcomponenti*. Sub acest nume se înțeleg componentii caracteristici, care sint, însă, în concentrații foarte reduse. Dintre aceștia fac parte: acizii naftenici, iodul, bromul, borul, vanadiul, litiul și alții mai puțin caracteristici. Acizii naftenici constituie un indiciu sigur al prezenței țiteiului. Proveniți din hidrocarburile cicloparafinice, ei lipsesc în regiunile zăcămintelor de țiteiuri fără cicloparafine. În unele țiteiuri din U.R.S.S., acizii naftenici ating concentrații de 2–3%, însă, în ape, concentrația lor este, în general, sub 1%. Apele cu o mineralizație bogată în Ca^{++} sint lipsite, în general, de acizi naftenici, chiar dacă țiteiul îi conține, din cauza precipitării naftenatilor de Ca.

Iodul este microcomponentul cel mai caracteristic al apelor de zăcămint. Deși în cantități foarte variate, 10–300 mg/l, concentrația lui în aceste ape este mult superioară celeia din apele marine și din apele oceanice (~ 0,05 mg/l), cu excepția apelor care saturează unele mîluri marine cu un conținut foarte ridicat de iod. Formarea acestor acumulări de iod în apele de zăcămint se datorește activității biologice intense care a însoțit geneza petrolului. După Vinogradov, unele alge conțin individual cantități de iod corespunzătoare unor cantități de 10–10³ tone de apă de mare.

Bromul este un microcomponent mai puțin caracteristic, deși se găsește frecvent în concentrații mai mari atît în apele marine, cît și în cele de zăcămint. El este prezent aproape totdeauna în condițiile în care a avut loc și o concentrație înaintată a clorurilor. Pentru evidențierea originii acumulării lui, se examinează raportul Cl/Br. În apa oceanică și în cea marină, acest raport prezintă o remarcabilă constanță în jurul cifrei de 292, ceea ce corespunde unui conținut de Br de 3,8–6,6 mg/l.

El se prezintă sporit în apele sărate rezultate din spălarea depozitelor de concentrație și, deci, și în apele de zăcămint, în special în cele de tipul CaCl_2 . În general, însă, conținutul de Br este redus în apele de zăcămint de tipul NaHCO_3 .

Borul este un microcomponent mai puțin caracteristic al apelor de zăcămint. Statistica indică o frecvență și o concentrație sporită a lui, fără a se putea preciza geneza acestor concentrări. El compensează, însă, întrucâtva, lipsa microcomponentului Br, găsindu-se îndeosebi în apele de tipul NaHCO_3 , în care poate atinge 1 000 mg/l. În apele de suprafață, dulci, el se găsește ca urme; în apele marine atinge 4,1–4,7 mg/l, iar în apele veterice (nu neapărat de zăcămint) atinge $10\text{--}10^2$ mg/l.

Amoniul este un microcomponent caracteristic mai mult pentru procesele de reducere care au loc în unele zăcămint și provine, în general, din reducerea compușilor organici oxidați ai azotului, fiind mai frecvent în apele de adâncime (tip CaCl_2).

e) Radioactivitatea grupează microcomponentii radon + produsele secundare de dezagregare ale elementelor radioactive din roci (U, Th, izotopul 40 al K etc.). Exprimată în radon, concentrația lor de este ordinul 10^{-9} ml/l și este cu atât mai redusă cu cât a trecut un timp mai îndelungat de la depărtarea apei respective de roca generatoare de radon. Trebuie observat totuși că, uneori, radioactivitatea apelor crește în primele decade de la părăsirea rocii generatoare, ceea ce se explică prin formarea unor faze intermediare mai active ale seriei de reacții de dezagregare.

f) Microcomponentii «negativi» sînt acei microcomponentii ai apelor subterane, a căror prezență face imposibilă coexistența hidrocarburilor. Azotații și chiar azotii, oxizii de fier și de aluminiu, alaiunii, oxizii și sărurile oxidate ale manganului, stabili în mediu oxidant, sînt, în general, incompatibili cu existența hidrocarburilor și detectarea lor permite, uneori, importante economii de explorare.

d. Hidrocarburile

1. Proprietăți individuale ale hidrocarburilor. a) Alcani inferiori. 1) Metanul CH_4 .

Greutate moleculară: 16,032; greutate specifică: $0,717 \text{ kg/m}^3 \text{N}$ sau $0,554$ densitatea față de aer.

— Puncte caracteristice ale legii de stare:

Punctul triplu: $T = 89,8^\circ \text{K} \approx -183,3^\circ \text{C}$;

$P = 78,3 \text{ mm col. Hg} \approx 0,1065 \text{ kg/cm}^2$.

Punctul de topire: la presiunea atmosferică are coordonatele: $P = 1,0332 \text{ kg/cm}^2$, $T = 90,5^\circ \text{K} \approx -183,60^\circ \text{C}$.

Punctul de fierbere: la presiunea atmosferică $P = 1,0332 \text{ kg/cm}^2$, $T = 111,5^\circ \text{K} \approx -161,6^\circ \text{C}$.

Punctul critic: $P_c = 45,6 \text{ at} = 47,1 \text{ kg/cm}^2$, $T_c = 191,0^\circ \text{K} = -82,1^\circ \text{C}$, $\gamma_c = 162 \text{ kg/m}^3 = 0,162 \text{ g/cm}^3$, $v_c = 0,00617 \text{ m}^3/\text{kg} = 6,17 \text{ cm}^3/\text{g}$.

Indicele de refracție al gazului la 20° și la presiunea atmosferică: $n_D = 1,000444$.

— Presiunea vaporilor în echilibru cu metanul în starea solidă (cristalină), determinată experimental, respectiv conform ecuațiilor (111) și (112), este dată în tabela 44.

Ecuațiile propuse pentru determinarea presiunii metanului în echilibru cu starea lui solidă:

$$\log P = -\frac{498,63}{T} + 1,75 \log T + 0,0063915 T + 4,60175; \quad (110)$$

$$\log P = -\frac{554,518}{T} - 1,0821 \log T + 10,1840 \quad (111)$$

$$\log P = 6,3018 - \frac{320,20}{255,84 + t} \quad (112)$$

în care:

P este presiunea de vaporii, în mm col. Hg;

T — temperatura, în $^\circ \text{K}$;

t — temperatura, în $^\circ \text{C}$.

— Presiunea de echilibru a vaporilor de metan, în prezența fazei lichide, determinată experimental și conform ecuațiilor (113), respectiv (114), (115) și (116) empirice, propuse, este dată în tabela 45.

Tabela 44. Presiunea de vaporii a metanului sub punctul triplu

$t, ^\circ \text{C}$	P , observată, mm col. Hg	P calculat		Abateră după ecuația (111),		Abateră după ecuația (112),	
		cu ecuația (111)	cu ecuația (112)	mm col. Hg	%	mm col. Hg	%
-196,21	8,52	8,51	8,52	+ 0,01	+ 0,11	0,00	0,00
-193,35	14,80	14,83	15,01	- 0,03	- 0,20	- 0,21	1,42
-192,89	16,00	16,16	16,32	- 0,16	- 1,00	- 0,32	- 2,00
-191,36	21,60	21,32	21,60	+ 0,28	+ 1,30	0,00	0,00
-189,28	30,53	30,58	30,98	0,00	- 0,00	- 0,48	- 1,57
-187,78	40,06	39,84	40,05	+ 0,22	+ 0,55	+ 0,01	+ 0,02
-186,67	46,70	46,84	46,91	- 0,14	- 0,30	- 0,21	- 0,45
-185,85	53,15	53,28	53,15	- 0,13	- 0,24	0,00	0,00
Abateră medie aritmetică				-	0,46	-	0,68

Tabela 45. Presiunea de vapori a metanului lichid în funcție de temperatură

$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{observată}}$	$P_{\text{calculată}}$ după ecuația		$\Delta P = P_{\text{obs}} - P_{\text{calc}}$		$\Delta P = P_{\text{obs}} - P_{\text{calculată}}$ (după 114 ... 116)	
		(113)	(114 - 116)	valoarea absolută	%	valoarea absolută	%
	mm col. Hg	mm col. Hg	mm col. Hg	mm col. Hg	(114)	mm col. Hg	(114)
-178,1	151	150,6	151,0	+ 0,4	+ 0,26	0,0	0,00
-173,1	262	261,7	261,9	+ 0,3	+ 0,11	+ 0,1	+ 0,28
-168,1	429	429,0	429,0	0,0	0,00	0,00	0,00
-163,1	670	674,7	669,4	- 4,7	- 0,70	10,6	+ 0,90
	ata	ata	ata (115)	at.	(115)	at.	(115)
-158,1	1,319	1,390	1,317	- 0,001	- 0,08	+ 0,002	+ 0,15
-153,1	1,905	1,905	1,901	0,000	0,00	+ 0,004	+ 0,21
-148,1	2,670	2,669	2,658	+ 0,001	+ 0,04	+ 0,012	+ 0,45
-143,1	3,641	3,643	3,641	- 0,002	- 0,06	0,000	0,00
-138,1	4,853	4,852	4,859	+ 0,001	+ 0,02	- 0,006	- 0,12
-133,1	6,338	6,339	6,352	- 0,001	- 0,02	- 0,014	- 0,22
-128,1	8,132	8,134	8,152	- 0,002	- 0,02	- 0,02	- 0,25
-123,1	10,27	10,28	10,29	- 0,01	- 0,10	- 0,02	- 0,19
-118,1	12,79	12,80	12,79	- 0,01	- 0,08	0,00	0,00
-113,1	15,74	15,74	după (116)		(116)	+ 0,01	(116)
-108,1	19,14	19,14	15,33	0,00	0,00	+ 0,01	+ 0,06
-103,1	23,05	23,05	19,13	0,00	0,00	+ 0,01	+ 0,05
-98,1	27,49	27,50	23,04	0,00	- 0,04	0,00	+ 0,04
-93,1	32,51	32,52	27,49	- 0,01	- 0,03	- 0,01	0,00
-88,1	38,15	38,14	32,52	- 0,01	+ 0,03	- 0,01	- 0,03
-82,1 *)	45,79 *)	45,76	38,16	+ 0,01	+ 0,07	0,00	- 0,03
	Abat. medie		45,79	+ 0,03	0,08		0,00
	Abat. maxim				0,08		

*) Punctul critic - incertitudine asupra presiunii, datorită condițiilor de măsură.

Ecuații empirice propuse pentru interpolarea presiunii de vapori a metanului lichid:

$$\log P_{\text{at}} = -\frac{595,546}{T} + 8,09938 - 4,04175 \cdot 10^{-2} T + 1,68655 \cdot 10^{-4} T^2 - 2,51715 \cdot 10^{-7} T^3 \quad (113)$$

valabilă în tot domeniul stării lichide (în coexistență cu vaporii),

$$\log P_{\text{mm}} = -6,5643 - \frac{380,22}{264,80 + t} \quad (114)$$

valabilă între $-182,49^\circ\text{C}$ și $-161,58^\circ\text{C}$;

$$\log P_{\text{at}} = 3,9347 - \frac{437,08}{272,66 + t} \quad (115)$$

valabilă între $-161,58^\circ\text{C}$ și $-118,1^\circ\text{C}$;

$$\log P_{\text{at}} = 4,4352 - \frac{600,17}{298,42 + t} \quad (116)$$

valabilă între $-118,1^\circ\text{C}$ și $-82,1^\circ\text{C}$;

sau

$$\log P_{\text{mm}} = -\frac{472,47}{T} + 1,75 \log T - 0,0096351 T + 4,00175, \quad (117)$$

recomandată pentru întregul domeniul al stării lichide

în care:

P_{at} este presiunea vaporilor în echilibru cu lichidul, în ata;
 P_{mm} — presiunea vaporilor în echilibru, în mm col. Hg (abs);
 t — temperatura, în $^\circ\text{C}$;
 T — temperatura, în $^\circ\text{K}$ (cu $0^\circ\text{C} = 273,13^\circ\text{K}$ pentru (113 - 116) și $0^\circ\text{C} = 273,10^\circ\text{K}$ pentru 117).

Mai exactă, dar mai greoaie, este ecuația (113).

— Legea de stare în starea gaz-vapori a metanului a fost determinată sub forma

$$P = \frac{5,1173 T \left(1 - \frac{y}{2}\right)}{v - \delta} - \frac{9370 (1 - 0,586 y)}{(v + 0,42)^2} \quad (118)$$

$$\text{în care } \delta = 10^{0,5611} - \frac{0,978}{v}, \quad (119)$$

iar y este definit implicit prin

$$\log (v - d) \frac{y}{(1 - y)^2} = \frac{527}{T} - 1,25 \log T - 0,813. \quad (120)$$

Aplicația ecuației (118) fiind greoaie, în tabela 46 sînt date rezultatele aplicării, $P = f(v, t)$, a ecuației (118); P în ata; T în $^\circ\text{K}$;

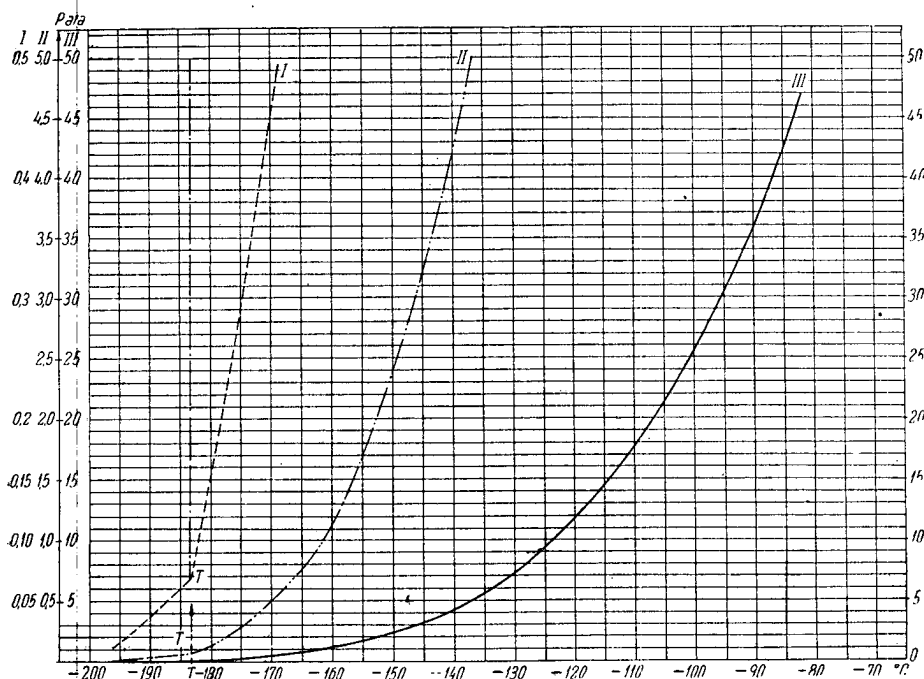


Fig. 104. Tensiunea de vapori a metanului cristalizat și a celui lichid, în funcție de temperatură: I — pe scară 0—0,5 ata; T = punctul triplu; II — pe scară 0—5,0 ata; III — pe scară 0—50 ata; C = punctul critic

v în cm^3/g , în comparație cu rezultatele experimentale obținute prin cercetarea unui metan cu o puritate de 99,923%, respectiv în tabela 47, sub forma volumului specific molar.

Tabela 46. Relația (P, v, t) a metanului; în tabela valorile lui P în ata în funcție de t , în $^{\circ}\text{C}$ și de v , în cm^3/g

v cm^3/g	Modul de determinare: E = experimental C = calculat	Temperaturi t , $^{\circ}\text{C}$				
		0,0	50	100	150	200
40	E	32,297	39,418	46,474	53,486	60,486
	C	32,291	39,388	46,429	53,444	60,459
35	E	36,514	44,760	52,935	61,040	69,158
	C	36,515	44,742	52,898	61,025	69,142
30	E	42,003	51,809	61,510	71,039	80,752
	C	42,013	51,794	61,496	71,138	80,766
25	E	49,441	61,504	73,445	85,260	97,050
	C	49,478	61,511	73,432	85,289	97,126
20	E	60,129	75,980	91,240	106,540	121,806
	C	60,198	75,831	91,274	106,623	121,967
15	E	76,879	99,004	120,854	142,426	163,973
	C	77,006	99,152	120,991	142,723	164,344
12	E	92,789	120,949	150,883	179,407	207,951
	C	92,740	122,093	151,017	179,736	208,357
10	E	107,950	145,076	181,840	218,122	254,261
	C	107,801	145,017	181,713	218,121	254,396

Relația (P, v, t) a metanului; în tabelă valorile lui P în ata, în funcție de t , în $^{\circ}\text{C}$ și de v , în cm^3/g .

Tabela 47. Greutatea specifică a metanului gazos în funcție de temperatură și presiune, în kmoli/m^3 , presiunea ata

$1/V$ kmoli/m^3	Temperatura, $t^{\circ}\text{C}$				
	0	50	100	150	200
	ata	ata	ata	ata	ata
1,50	31,18	38,00	44,76	51,49	58,19
2,00	40,54	49,03	59,23	68,45	77,67
2,50	49,53	61,62	73,59	85,43	97,25
3,00	58,06	73,22	87,85	102,43	117,09
4,00	74,98	96,39	117,50	138,36	159,19
5,00	89,69	117,60	145,29	172,40	199,61
6,00	104,47	139,81	174,78	209,30	243,71

În același scop s-a mai propus ecuația

$$P = RTd + d^2 \left\{ RT (B_0 - bd) - (A_0 + ad - \alpha ad^4) - \frac{1}{T^2} [C_0 - Cd (1 + \gamma d^2) e^{(1-\gamma d^2)}] \right\} \quad (121)$$

în care:

P este presiunea, în ata;

$R = 0,08206 \text{ l.at/mol}^{\circ}\text{C}$;

$T^{\circ} = t^{\circ} + 273,13$;

$d = 1/v$, v = volumul specific molar, moli/l ,

Tabela 48. Valoarea coeficientului de abatere Z dela legea gazelor perfecte pentru metan

P, ata	la temperatura: (°C)														P, ata
	21,11	37,78	54,44	71,11	87,78	104,44	121,11	137,78	154,44	171,11	187,78	204,44	221,11	237,78	
0,00	1,0030	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0001	1,0000	1,0000	1,0000	0,00
13,61	0,9749	0,9795	0,9833	0,9865	0,9891	0,9913	0,9932	0,9947	0,9960	0,9972	0,9980	0,9989	0,9996	1,0000	13,61
27,22	0,9503	0,9598	0,9673	0,9736	0,9789	0,9833	0,9869	0,9900	0,9926	0,9948	0,9966	0,9982	0,9995	1,0002	27,22
40,82	0,9260	0,9410	0,9522	0,9617	0,9695	0,9760	0,9814	0,9859	0,9897	0,9929	0,9956	0,9979	0,9999	1,0016	40,82
54,43	0,9037	0,9235	0,9383	0,9508	0,9610	0,9695	0,9766	0,9825	0,9875	0,9916	0,9951	0,9981	1,0008	1,0038	54,43
68,04	0,8823	0,9072	0,9257	0,9410	0,9535	0,9639	0,9725	0,9798	0,9858	0,9908	0,9950	0,9986	1,0018	1,0048	68,04
81,65	0,8632	0,8892	0,9119	0,9303	0,9456	0,9582	0,9685	0,9772	0,9843	0,9905	0,9957	1,0000	1,0037	1,0069	81,65
95,26	0,8459	0,8729	0,8919	0,9109	0,9284	0,9439	0,9577	0,9694	0,9798	0,9891	0,9970	1,0047	1,0084	1,0119	95,26
108,87	0,8292	0,8566	0,8749	0,8934	0,9109	0,9266	0,9411	0,9544	0,9664	0,9778	0,9881	1,0000	1,0063	1,0100	108,87
122,48	0,8129	0,8403	0,8586	0,8771	0,8949	0,9113	0,9266	0,9407	0,9536	0,9664	0,9781	1,0000	1,0063	1,0100	122,48
136,09	0,7969	0,8243	0,8426	0,8611	0,8789	0,8953	0,9113	0,9266	0,9407	0,9536	0,9664	1,0000	1,0063	1,0100	136,09
149,70	0,7810	0,8084	0,8267	0,8452	0,8630	0,8794	0,8953	0,9113	0,9266	0,9407	0,9536	1,0000	1,0063	1,0100	149,70
163,31	0,7651	0,7925	0,8108	0,8293	0,8471	0,8635	0,8794	0,8953	0,9113	0,9266	0,9407	1,0000	1,0063	1,0100	163,31
176,92	0,7492	0,7766	0,7949	0,8134	0,8312	0,8476	0,8635	0,8794	0,8953	0,9113	0,9266	1,0000	1,0063	1,0100	176,92
190,53	0,7333	0,7607	0,7790	0,7975	0,8153	0,8317	0,8476	0,8635	0,8794	0,8953	0,9113	1,0000	1,0063	1,0100	190,53
204,14	0,7174	0,7448	0,7631	0,7816	0,7994	0,8158	0,8317	0,8476	0,8635	0,8794	0,8953	1,0000	1,0063	1,0100	204,14
217,75	0,7015	0,7289	0,7472	0,7657	0,7835	0,7999	0,8158	0,8317	0,8476	0,8635	0,8794	1,0000	1,0063	1,0100	217,75
231,36	0,6856	0,7130	0,7313	0,7498	0,7676	0,7840	0,7999	0,8158	0,8317	0,8476	0,8635	1,0000	1,0063	1,0100	231,36
244,97	0,6697	0,6971	0,7154	0,7339	0,7517	0,7681	0,7840	0,7999	0,8158	0,8317	0,8476	1,0000	1,0063	1,0100	244,97
258,58	0,6538	0,6812	0,6995	0,7180	0,7358	0,7522	0,7681	0,7840	0,7999	0,8158	0,8317	1,0000	1,0063	1,0100	258,58
272,19	0,6379	0,6653	0,6836	0,7021	0,7199	0,7363	0,7522	0,7681	0,7840	0,7999	0,8158	1,0000	1,0063	1,0100	272,19
285,80	0,6220	0,6494	0,6677	0,6862	0,7040	0,7204	0,7363	0,7522	0,7681	0,7840	0,7999	1,0000	1,0063	1,0100	285,80
299,41	0,6061	0,6335	0,6518	0,6703	0,6881	0,7045	0,7204	0,7363	0,7522	0,7681	0,7840	1,0000	1,0063	1,0100	299,41
313,02	0,5902	0,6176	0,6359	0,6544	0,6722	0,6886	0,7045	0,7204	0,7363	0,7522	0,7681	1,0000	1,0063	1,0100	313,02
326,63	0,5743	0,6017	0,6199	0,6384	0,6562	0,6726	0,6886	0,7045	0,7204	0,7363	0,7522	1,0000	1,0063	1,0100	326,63
340,24	0,5584	0,5858	0,6040	0,6225	0,6403	0,6567	0,6726	0,6886	0,7045	0,7204	0,7363	1,0000	1,0063	1,0100	340,24
353,85	0,5425	0,5699	0,5881	0,6066	0,6244	0,6408	0,6567	0,6726	0,6886	0,7045	0,7204	1,0000	1,0063	1,0100	353,85
367,46	0,5266	0,5540	0,5722	0,5907	0,6085	0,6249	0,6408	0,6567	0,6726	0,6886	0,7045	1,0000	1,0063	1,0100	367,46
381,07	0,5107	0,5381	0,5563	0,5748	0,5926	0,6090	0,6249	0,6408	0,6567	0,6726	0,6886	1,0000	1,0063	1,0100	381,07
394,68	0,4948	0,5222	0,5404	0,5589	0,5767	0,5931	0,6090	0,6249	0,6408	0,6567	0,6726	1,0000	1,0063	1,0100	394,68
408,29	0,4789	0,5063	0,5245	0,5430	0,5608	0,5772	0,5931	0,6090	0,6249	0,6408	0,6567	1,0000	1,0063	1,0100	408,29
421,90	0,4630	0,4904	0,5086	0,5271	0,5449	0,5613	0,5772	0,5931	0,6090	0,6249	0,6408	1,0000	1,0063	1,0100	421,90
435,51	0,4471	0,4745	0,4927	0,5112	0,5290	0,5454	0,5613	0,5772	0,5931	0,6090	0,6249	1,0000	1,0063	1,0100	435,51
449,12	0,4312	0,4586	0,4768	0,4953	0,5131	0,5295	0,5454	0,5613	0,5772	0,5931	0,6090	1,0000	1,0063	1,0100	449,12
462,73	0,4153	0,4427	0,4609	0,4794	0,4972	0,5136	0,5295	0,5454	0,5613	0,5772	0,5931	1,0000	1,0063	1,0100	462,73
476,34	0,4000	0,4274	0,4456	0,4641	0,4819	0,4983	0,5142	0,5295	0,5454	0,5613	0,5772	1,0000	1,0063	1,0100	476,34
489,95	0,3841	0,4115	0,4297	0,4482	0,4660	0,4824	0,4983	0,5142	0,5295	0,5454	0,5613	1,0000	1,0063	1,0100	489,95
503,56	0,3682	0,3956	0,4138	0,4323	0,4501	0,4665	0,4824	0,4983	0,5142	0,5295	0,5454	1,0000	1,0063	1,0100	503,56
517,17	0,3523	0,3797	0,3979	0,4164	0,4342	0,4506	0,4665	0,4824	0,4983	0,5142	0,5295	1,0000	1,0063	1,0100	517,17
530,78	0,3364	0,3638	0,3820	0,4005	0,4183	0,4347	0,4506	0,4665	0,4824	0,4983	0,5142	1,0000	1,0063	1,0100	530,78
544,39	0,3205	0,3479	0,3661	0,3846	0,4024	0,4188	0,4347	0,4506	0,4665	0,4824	0,4983	1,0000	1,0063	1,0100	544,39
557,99	0,3046	0,3320	0,3502	0,3687	0,3865	0,4029	0,4188	0,4347	0,4506	0,4665	0,4824	1,0000	1,0063	1,0100	557,99
571,60	0,2887	0,3161	0,3343	0,3528	0,3706	0,3870	0,4029	0,4188	0,4347	0,4506	0,4665	1,0000	1,0063	1,0100	571,60
585,21	0,2728	0,3002	0,3184	0,3369	0,3547	0,3711	0,3870	0,4029	0,4188	0,4347	0,4506	1,0000	1,0063	1,0100	585,21
598,82	0,2569	0,2843	0,3025	0,3210	0,3388	0,3552	0,3711	0,3870	0,4029	0,4188	0,4347	1,0000	1,0063	1,0100	598,82
612,43	0,2410	0,2684	0,2866	0,3051	0,3229	0,3393	0,3552	0,3711	0,3870	0,4029	0,4188	1,0000	1,0063	1,0100	612,43
626,04	0,2251	0,2525	0,2707	0,2892	0,3070	0,3234	0,3393	0,3552	0,3711	0,3870	0,4029	1,0000	1,0063	1,0100	626,04
639,65	0,2092	0,2366	0,2548	0,2733	0,2911	0,3075	0,3234	0,3393	0,3552	0,3711	0,3870	1,0000	1,0063	1,0100	639,65
653,26	0,1933	0,2207	0,2389	0,2574	0,2752	0,2916	0,3075	0,3234	0,3393	0,3552	0,3711	1,0000	1,0063	1,0100	653,26
666,87	0,1774	0,2048	0,2230	0,2415	0,2593	0,2757	0,2916	0,3075	0,3234	0,3393	0,3552	1,0000	1,0063	1,0100	666,87
680,48	0,1615	0,1889	0,2071	0,2256	0,2434	0,2598	0,2757	0,2916	0,3075	0,3234	0,3393	1,0000	1,0063	1,0100	680,48

iar coeficienții constanți au, după unii autori, valorile: $B_0=0,04260$; $A_0=1,8550$; $C_1 10^{-6} = 0,022570$; $b=0,00338004$; $a=0,044900$; $C=2\,545$; $\gamma=0,0060$; $\alpha=0,000124359$, valabilă între limitele $d=2-18$; iar după alți autori: $B_0=(0,34925)^3$; $A_0=(1,36198)^2$; $C_0=(150,233)^2$; $a=(0,366924)^3$; $C=(13,653)^3$; $\gamma=(0,07746)^2$; $\alpha=(0,499143)^2$; greutatea moleculară $CH_4=16,031$;

sau ecuația:

$$P = \frac{RT \left(1 - \frac{C}{VT^3} \right)}{V^2} \left[V + B_0 \left(1 - \frac{b}{V} \right) \right] - \frac{A_0 \left(1 - \frac{a}{V} \right)}{V^2} \quad (122)$$

cu $A_0=2,2769$; $a=0,01855$; $B_0=0,05587$; $b=-0,01587$; $C=128\,833$; sau ecuația

$$PV = RT + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^4} \quad (123)$$

in care:

$$\begin{aligned} B &= RTB_0 - A_0 - Rc/T^2; \\ C &= A_0a - RTB_0b - RB_0c/T^2; \\ D &= RB_0bc/T^2; \end{aligned}$$

iar $A_0=2,099$; $B_0=0,05095$; $a=0,02065$; $b=0,02860$ și $c=2,36 \cdot 10^5$.

Ecuația Van der Waals

$$\left(P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT \quad (123)$$

in care valorile coeficienților: $a=36,8 \cdot 10^{-4}$ și $b=155 \cdot 10^{-5}$, este mai comodă de aplicat, dar prezintă totuși abateri de 4-5% în gamele 90-120 at (la 0...100°) și 80-120 at (la 100...200°), față de ecuațiile (121), (122) și (123) care prezintă o abatere de 0,2-0,6% în aceleași domenii de t° și de P .

Pentru aplicații curente, se preferă aplicarea ecuației $Pv = ZRT$, luindu-se pentru Z valorile determinate experimental, date în tabela 48, respectiv ZT/T_c din tabela 49.

— Viscositatea absolută a metanului în starea gazoasă este teoretic independentă de presiune (în măsura în care el satisface legea gazelor perfecte). Pentru ilustrarea acestei constanțe, experiența a dovedit că la temperatura de 300,05°K, viscositatea absolută la presiunea de 79 mm col. Hg este $(1114,4 \pm 0,4) \times 10^{-7}$ poise; la 448 mm col. Hg, $(1116,1 \pm 0,7) \times 10^{-7}$ poise și la 758 mm col. Hg, $(1116,3 \pm 0,1) \times 10^{-7}$ poise.

Din cauza măsurării indirecte, determinările experimentale rămân în limita $\pm 0,2-0,5 \times 10^{-7} \%$.

Tabela 49. Valoarea coeficientului ZT/T_0 de abatere de la legea gazelor perfecte pentru metan (date considerate ca mai puțin exacte, dar care acoperă un domeniu de mărimi mai larg)

P, ata	Valoarea $P_0 V_0$ la temperatura în (°C)									P, ata
	-70	-50	-25	0	25	50	100	150	200	
0	0,7455	0,8189	0,9106	1,0024	1,0942	1,1859	1,269 5	1,5530	1,7365	0
1	0,7410	0,8150	0,9075	1,0000	1,0922	1,1845	1,2686	1,5525	1,7363	1
30	0,5910	0,6991	0,8183	0,9303	—	1,1412	1,3411	1,5370	1,7311	30
40	0,5244	0,6547	0,7873	0,9065	1,0198	1,1284	—	—	—	40
50	0,4425	0,6069	—	0,8833	—	—	1,3268	1,5319	1,7309	50
60	0,3366	0,5551	0,7243	0,8611	0,9871	1,1020	—	1,5305	1,7306	60
80	0,2556	0,4604	0,6651	0,8199	0,9569	1,0806	—	—	—	80
100	0,2808	0,4088	0,6167	0,7853	0,9319	1,0686	—	—	—	100
120	0,3175	0,4095	0,5877	0,7604	0,9126	1,0498	—	—	—	120
140	0,3543	0,4304	0,5801	0,7457	0,9003	1,0408	—	—	—	140
160	0,3915	0,4601	0,5891	0,7425	0,8949	1,0367	—	—	—	160
180	0,4288	0,4924	0,6079	0,7482	0,8970	1,0373	1,2995	—	—	180
200	0,4656	0,5269	0,6319	0,7631	0,9048	1,0437	1,3076	1,5504	1,7760	200
250	0,5567	0,6142	0,7066	0,8184	0,9469	1,0776	1,3364	—	1,8107	250
300	0,6458	0,7025	0,7879	0,8886	1,0062	1,1286	1,3785	1,6234	1,8534	300
400	0,8185	0,8750	0,9561	1,0468	1,1499	1,2608	1,4924	1,7268	1,9586	400
500	0,9867	1,0433	1,1221	1,2086	1,3064	1,4106	1,6277	1,8542	2,0803	500
600	1,1487	1,2071	1,2862	1,3709	1,4659	1,5653	1,7729	1,9935	2,2131	600
800	1,4631	1,5246	1,6046	1,6894	1,7801	1,8781	2,0744	2,2828	2,4949	800
1 000	1,7657	1,8287	1,9110	2,0000	2,0898	2,1845	2,3757	2,5797	2,7861	1 000

Pentru evaluarea variației ei în funcție de temperatură se poate considera (v. și tabelele 50 și 51):

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + 168}{T + 168} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5} \quad (124)$$

unde μ_0 este viscozitatea absolută, la $T_0 = 273^\circ\text{K}$, a metanului, $(1\,030,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-7}$ poise.

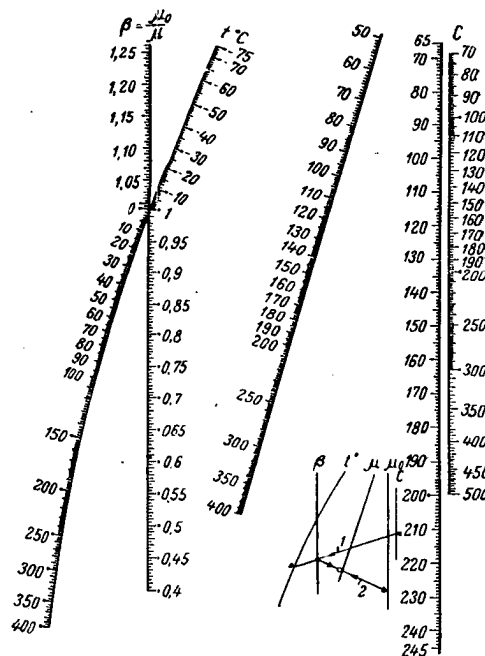
Tabela 50. Viscozitatea metanului la presiunea atmosferică, în comparație cu aceea a hidrogenului, în poise

T°, K	$\mu \cdot 10^7$		T°, K	$\mu \cdot 10^7$	
	H ₂	CH ₄		H ₂	CH ₄
90	390,2	364,9	200	680,9	777,8
100	421,2	402,8	210	703,9	814,3
110	451,5	440,7	220	726,7	850,1
120	480,5	478,3	230	749,1	885,0
130	508,1	516,0	240	770,7	919,1
140	534,5	559,7	250	792,5	953,0
150	560,3	591,4	260	813,8	986,3
160	585,4	628,9	270	835,0	1 019,8
170	609,8	666,1	280	855,5	1 052,5
180	634,0	703,1	290	875,8	1 084,4
190	657,5	740,6	296,1	888,1	1 103,6
—	—	—	300	895,9	1 115,9

Tabela 51. Viscozitatea absolută a metanului între 0°C și 100°C, μ în poise

t°	$10^7 \mu$	t°	$10^7 \mu$
0	1 059	60	1 255
20	1 125	70	1 289
30	1 171	80	1 216
40	1 191	90	1 345
50	1 220	100	1 380

sau grafic, cu ajutorul abacei din fig. 105, care interpretează ecuația (124).

Fig. 105. Nomogramă pentru calculul variației în funcție de temperatură, a viscozității hidrocarburilor gazoase C — scara coeficienților C din ecuația (124); μ_0 — scara viscozităților în starea normală; μ — scara viscozităților căutate; $t^\circ\text{C}$ — scara temperaturilor efective; $\beta = \frac{\mu}{\mu_0}$ scara auxiliară.

Modul de lucru: $C \rightarrow t^\circ \rightarrow \beta \rightarrow \mu_0 \rightarrow \mu$

La temperaturi și la presiuni foarte înalte, viscozitatea metanului prezintă anomalii (v. tabela 52).

Se observă că nici legea de creșterea în funcție de temperatură (124) nu mai este respectată,

Tabela 52. Viscositatea absolută a metanului la presiuni mari

t°C	Viscositatea 10 ⁶ μ (cP), la presiunea P, în ata								
	1	27,2	47,6	68,0	102,1	136,1	204,1	272,2	340,2
25	110	119	127	137	160	182	223	256	279
75	125	133	139	145	159	175	207	236	261
125	140	147	152	157	165	176	199	226	248
175	154	158	162	166	174	183	201	219	235
225	167	170	174	178	183	189	202	213	225

nici constanța viscozității în funcție de temperatură, viscozitatea crescând sensibil la presiuni mari și prezentând față de temperatură un minim la o temperatură de 75...175°, care crește cu presiunea.

— Fugacitate-activitate (definiții, v. IV A.c. și e.). Coeficienții de activitate γ, pentru metan, sînt dați în tabela 53.

Coeficienții de fugacitate ai metanului sînt dați în tabela 54.

— Coeficienții de echilibru fiind funcții de presiune, de temperatură și de compoziția restului sistemului, ei diferă și de la sistem la sistem. Pentru calcule aproximative, coeficienții considerați în primă aproximație, independenți de sistem pot fi deduși din diagrama dată în fig. 106 și în fig. 107.

Pentru calcule mai exacte, se recomandă folosirea valorilor date în tabela 55.

— Căldura specifică sub presiune constantă, C_p, la presiunea atmosferică, a metanului poate fi dedusă, între 298,61 < T < 1 000°K, cu relațiile (126)–(130), folosind tabela 56:

$$C_p = 3,381 + 18,044 \cdot 10^{-3} T - 43,00 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (125)$$

sau

$$C_p = 4,171 + 14,450 \cdot 10^{-3} T + 2,67 \cdot 10^{-7} T^2 - 1,722 \cdot 10^{-9} T \quad (126)$$

unde:

C_p este căldura specifică la o presiune constantă de 1 at, în kcal/kmol°C;

T — temperatura absolută, în °K.

Pentru calculul lui C_p, în kcal/kg°C, se pot folosi:

$$C_p = 0,2073 + 1,125 \cdot 10^{-3} T - 0,2681 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (127)$$

sau

$$C_p = 0,2602 + 0,9012 \cdot 10^{-3} T + 1,665 \cdot 10^{-6} T^2 - 1,718 \cdot 10^{-8} T^2 \quad (128)$$

Tabela 53. Coeficienții de activitate ai metanului, γ

P, ata	La temperatura, °C							P, ata
	21,1	37,8	54,4	71,1	87,8	104,4	121,1	
6,804	0,9872	0,9901	0,9919	0,9931	0,9946	0,9956	0,9964	6,804
13,61	0,9759	0,9802	0,9840	0,9867	0,9893	0,9912	0,9929	13,61
20,41	0,9628	0,9703	0,9760	0,9802	0,9839	0,9869	0,9893	20,41
27,22	0,9509	0,9608	0,9682	0,9738	0,9788	0,9835	0,9859	27,22
34,02	0,9394	0,9514	0,9607	0,9677	0,9736	0,9786	0,9827	34,02
40,82	0,9277	0,9422	0,9531	0,9613	0,9686	0,9742	0,9792	40,82
47,63	0,9158	0,9326	0,9456	0,9558	0,9646	0,9716	0,9772	47,63
54,43	0,9047	0,9232	0,9382	0,9507	0,9612	0,9696	0,9762	54,43
61,23	0,8934	0,9136	0,9306	0,9447	0,9576	0,9686	0,9762	61,23
68,04	0,8827	0,9047	0,9236	0,9394	0,9538	0,9664	0,9762	68,04
74,84	0,8725	0,8954	0,9162	0,9338	0,9496	0,9638	0,9762	74,84
81,64	0,8627	0,8864	0,9092	0,9286	0,9462	0,9624	0,9762	81,64
88,44	0,8533	0,8778	0,9024	0,9236	0,9428	0,9606	0,9762	88,44
95,24	0,8443	0,8696	0,8952	0,9180	0,9388	0,9582	0,9762	95,24
102,04	0,8357	0,8618	0,8884	0,9130	0,9354	0,9564	0,9762	102,04
108,84	0,8275	0,8544	0,8820	0,9084	0,9324	0,9552	0,9762	108,84
115,64	0,8197	0,8474	0,8760	0,9044	0,9298	0,9542	0,9762	115,64
122,44	0,8123	0,8408	0,8704	0,8996	0,9266	0,9524	0,9762	122,44
129,24	0,8053	0,8346	0,8652	0,8952	0,9232	0,9506	0,9762	129,24
136,04	0,7987	0,8288	0,8604	0,8912	0,9206	0,9492	0,9762	136,04
142,84	0,7925	0,8234	0,8560	0,8876	0,9184	0,9482	0,9762	142,84
149,64	0,7867	0,8184	0,8520	0,8844	0,9164	0,9472	0,9762	149,64
156,44	0,7813	0,8138	0,8484	0,8816	0,9144	0,9462	0,9762	156,44
163,24	0,7763	0,8096	0,8452	0,8784	0,9124	0,9452	0,9762	163,24
170,04	0,7717	0,8058	0,8424	0,8764	0,9104	0,9442	0,9762	170,04
176,84	0,7675	0,8024	0,8396	0,8744	0,9084	0,9432	0,9762	176,84
183,64	0,7637	0,8004	0,8384	0,8724	0,9064	0,9422	0,9762	183,64
190,44	0,7603	0,7978	0,8364	0,8704	0,9044	0,9412	0,9762	190,44
197,24	0,7573	0,7956	0,8352	0,8684	0,9024	0,9402	0,9762	197,24
204,04	0,7547	0,7938	0,8344	0,8664	0,9004	0,9392	0,9762	204,04

Tabela 54. Coeficienții de fugacitate pentru metan*)

P, ata	f. în at la temperatura: (°C)							P, ata
	21,1	37,8	54,4	71,1	87,8	104,4	121,1	
6,804	6,715	6,735	6,746	6,754	6,766	6,772	6,780	6,804
13,61	13,28	13,34	13,39	13,43	13,46	13,49	13,51	13,61
20,41	19,65	19,81	19,92	20,01	20,07	20,14	20,22	20,41
27,22	25,89	26,16	26,37	26,50	26,65	26,75	26,84	27,22
34,02	31,95	32,36	32,68	32,91	33,12	33,30	33,44	34,02
40,82	37,86	38,46	38,90	39,23	39,54	39,77	39,96	40,82
47,63	43,30	44,00	44,50	44,92	45,23	45,51	45,75	47,63
54,43	48,30	49,10	49,60	50,00	50,36	50,69	51,00	54,43
61,23	52,80	53,70	54,30	54,80	55,26	55,69	56,09	61,23
68,04	56,80	57,80	58,50	59,10	59,66	60,19	60,69	68,04
74,84	60,30	61,40	62,20	62,80	63,46	64,09	64,69	74,84
81,64	63,30	64,50	65,40	66,10	66,86	67,59	68,29	81,64
88,44	65,80	67,10	68,10	68,90	69,72	70,54	71,34	88,44
95,24	67,80	69,20	70,30	71,20	72,12	73,04	73,94	95,24
102,04	69,30	70,80	72,00	73,00	74,02	75,04	76,04	102,04
108,84	70,80	72,40	73,70	74,80	75,92	77,04	78,14	108,84
115,64	72,30	74,00	75,40	76,60	77,82	79,04	80,24	115,64
122,44	73,80	75,60	77,10	78,40	79,72	81,04	82,34	122,44
129,24	75,30	77,20	78,80	80,20	81,62	83,04	84,44	129,24
136,04	76,80	78,80	80,50	82,00	83,52	85,04	86,54	136,04
142,84	78,30	80,40	82,20	83,80	85,42	87,04	88,64	142,84
149,64	79,80	82,00	83,90	85,60	87,32	89,04	90,74	149,64
156,44	81,30	83,60	85,60	87,40	89,22	91,04	92,84	156,44
163,24	82,80	85,20	87,30	89,20	91,12	93,04	94,94	163,24
170,04	84,30	86,80	89,00	91,00	93,02	95,04	97,04	170,04
176,84	85,80	88,40	90,70	92,80	94,92	97,04	99,14	176,84
183,64	87,30	90,00	92,40	94,60	96,82	99,04	101,24	183,64
190,44	88,80	91,60	94,10	96,40	98,72	101,04	103,34	190,44
197,24	90,30	93,20	95,80	98,20	100,62	103,04	105,54	197,24
204,04	91,80	94,80	97,50	100,00	102,52	105,04	107,64	204,04

*) Calculați cu o aproximație medie de 0,03%.

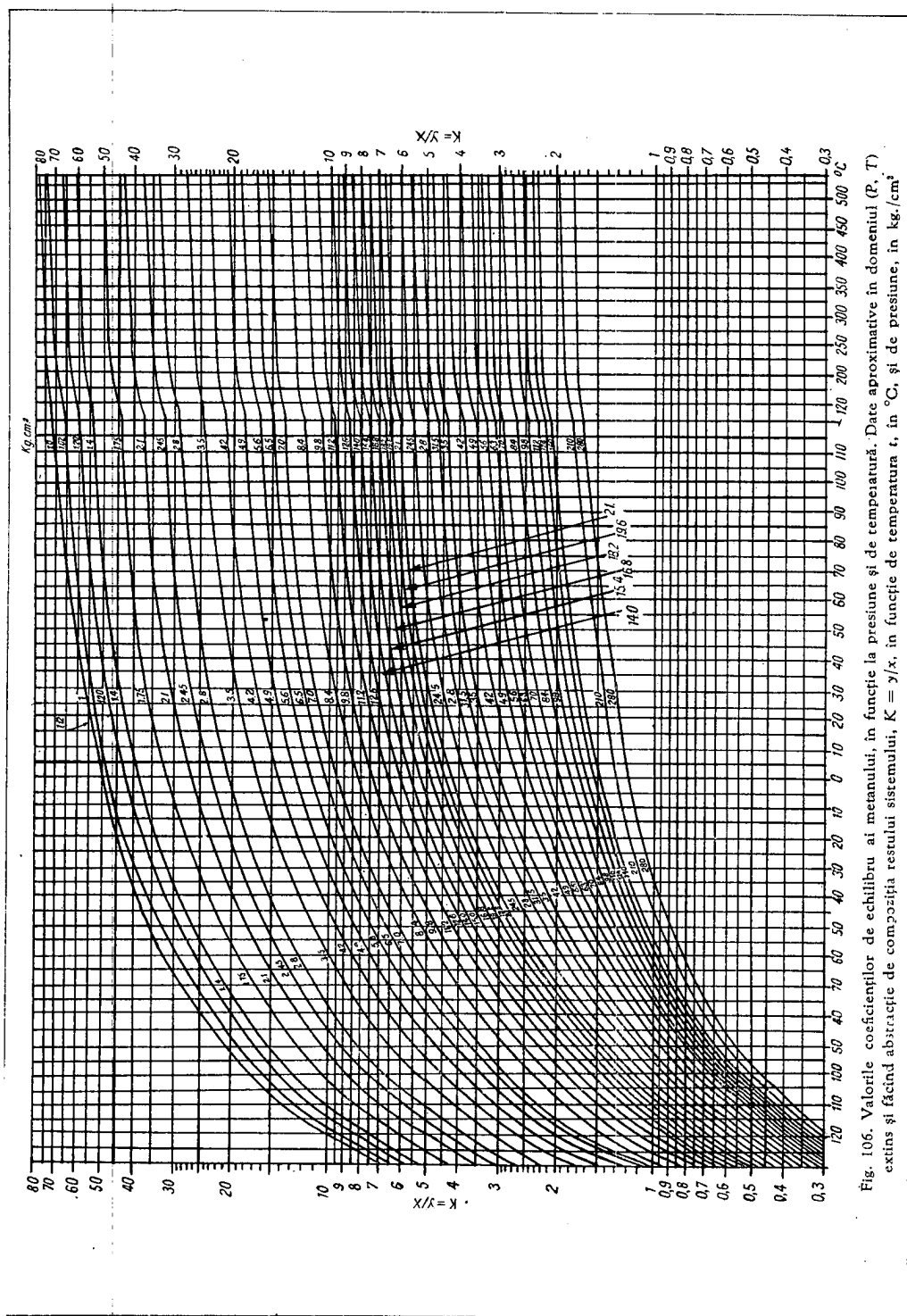


Fig. 106. Valorile coeficienților de echilibru ai metanului, în funcție la presiune și de temperatură. Date aproximative în domeniul (P, T) extins și făcând abstracție de compoziția restului sistemului, $K = y/x$, în funcție de temperatura t , în $^{\circ}\text{C}$, și de presiune, în kg./cm^2 .

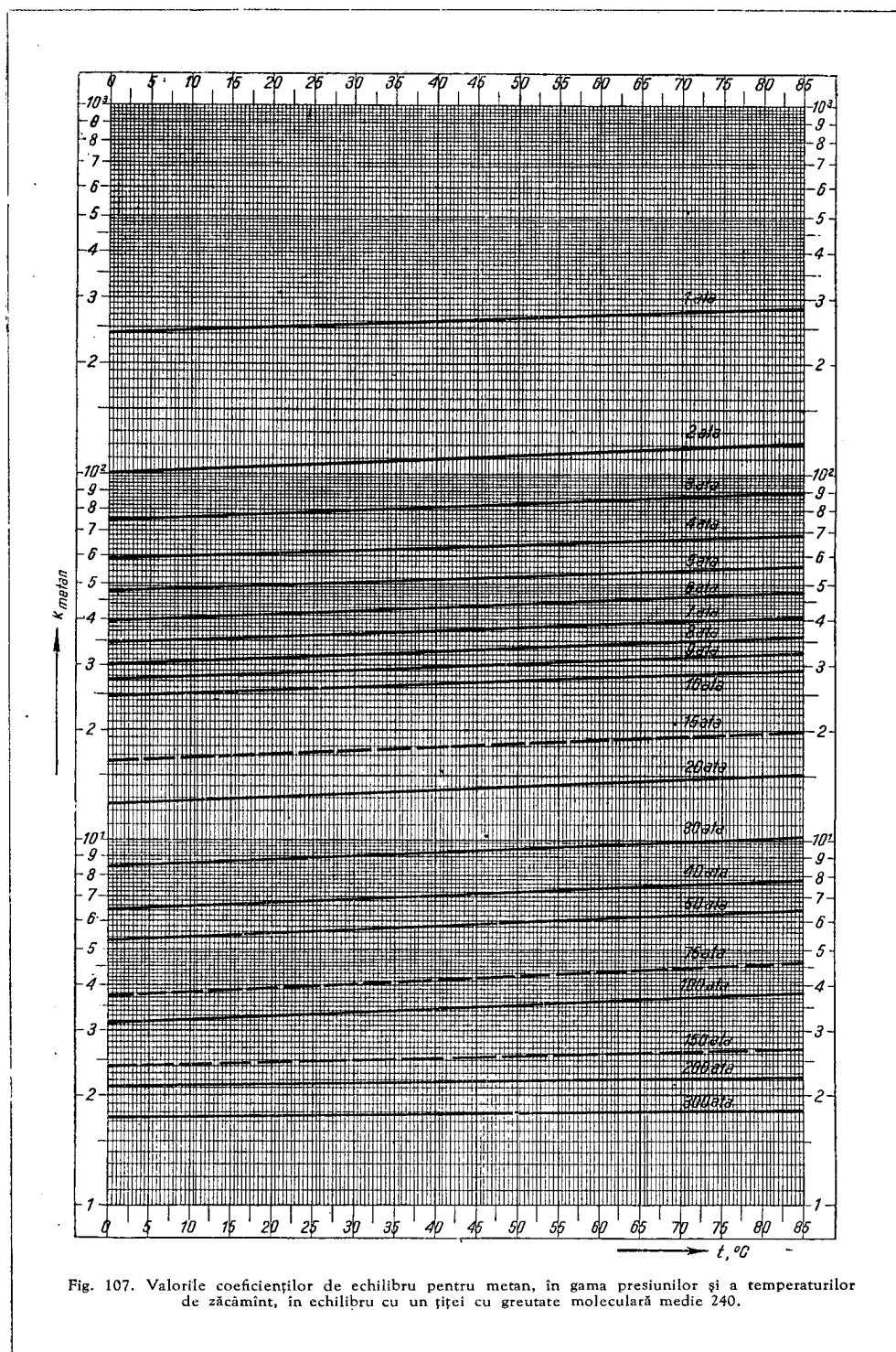


Tabela 55. Valorile coeficienților de echilibru al metanului în funcție de presiune, temperatură și greutatea moleculară medie a restului sistemului

Presiunea absolută în ata	Greutatea moleculară 60			Greutatea moleculară 75			Greutatea moleculară 100			Greutatea moleculară 200			Greutatea moleculară 300		
	37,8°	71,1°	104,4°	37,8°	71,1°	104,4°	37,8°	71,1°	104,4°	37,8°	71,1°	104,4°	37,8°	71,1°	104,4°
1	+	—	—	224	247	248	247	285	293	259	276	287	203	226	228
1,361	+	—	—	165	181	182	181	210	216	190	202	211	149	166	168
2,722	+	—	—	82,8	90,9	91,5	91,0	105	108	95,5	102	106	75,1	83,4	84,2
4,083	+	—	—	55,4	60,8	61,3	60,9	70,1	72,1	63,9	65,2	70,7	50,4	55,9	56,4
6,804	+	—	—	33,3	39,1	42,0	44,0	51,0	56,0	40,6	43,8	46,8	30,4	34,0	35,5
13,608	+	—	—	17,0	18,8	19,5	21,1	22,9	22,41	20,1	21,4	22,6	15,7	17,3	17,9
20,42	+	—	—	11,6	12,6	12,9	13,9	14,8	15,2	13,4	14,3	14,7	10,9	11,8	12,1
27,22	+	—	—	8,83	9,51	9,82	10,3	11,0	11,3	10,1	10,88	11,1	8,40	9,00	9,25
34,05	6,56	6,81	7,13	7,20	7,73	8,00	8,24	8,88	9,04	8,24	8,8	9,04	6,87	7,33	7,57
51,05	4,50	4,57	4,89	5,01	5,32	5,52	5,56	5,94	6,10	5,74	6,15	6,32	6,82	5,16	5,33
68,04	3,42	3,42	3,66	3,90	4,07	4,19	4,28	4,54	4,60	4,49	4,75	4,84	3,82	4,12	4,24
85,10	2,27	2,72	2,89	3,21	3,34	3,42	3,52	3,72	3,74	3,77	4,06	4,06	3,27	3,50	3,60
102,1	1,28	2,21	2,30	2,72	2,82	2,85	3,00	3,16	3,12	3,26	3,51	3,51	2,86	3,06	3,16
119,1	1,93	1,80	1,80	2,36	2,40	2,45	2,61	2,76	2,71	2,94	3,12	3,13	2,56	2,75	2,84
136,1	1,63	1,43	—	2,07	2,06	2,08	2,33	2,45	2,37	2,70	2,82	2,82	2,36	2,51	2,59
170,1	+	—	—	1,60	1,52	1,48	1,93	2,03	1,93	2,36	2,43	2,40	2,02	2,15	2,25
204,2	+	—	—	1,17	—	—	1,65	1,74	1,59	2,14	2,14	2,09	1,78	1,90	2,00

Pentru calculul lui C_p în kcal/m³N°C, se pot folosi:

$$C_p = 0,1487 + 0,807 \cdot 10^{-3} T - 0,1925 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (129)$$

sau:

$$C_p = 0,1867 + 0,646 \cdot 10^{-3} T + 1,195 \cdot 10^{-6} T^2 - 1,233 \cdot 10^{-8} T^3. \quad (130)$$

Pentru calcule rapide s-a propus și:

$$C_p = 5,90 + 9,6 \cdot 10^{-3} T, \quad (128')$$

kcal/kmol°K

$$C_p = 0,368 + 0,599 \cdot 10^{-3} T, \quad (129')$$

kcal/kg°K

$$C_p = 0,264 + 0,43 \cdot 10^{-3} T \quad (130')$$

kcal/m³N°K.

Tabela 56. Căldurile specifice ale metanului în kcal/kmol °C la presiunea constantă de 1 ata

T, °K	C_p	T, °K	C_p
250	8,39	800	15,78
300	8,89	900	16,84
350	9,55	1 000	17,79
400	10,30	1 100	18,63
450	11,08	1 200	19,38
500	11,84	1 300	20,03
600	13,28	1 400	20,60
700	14,59	1 500	21,10

Căldura specifică sub volum constant, C_v , la temperatură joasă, poate fi dedusă din raportul $C_p/C_v = 1,316$, pentru metan. Valoarea lui C_v la presiuni și la temperaturi înalte, pentru hidrocarburi pure, este relativ puțin utilizată și poate fi dedusă practic prin derivarea, respectiv prin calculul raportului diferențelor finite $\Delta H/\Delta T$ în condițiile corespunzătoare.

— Căldura latentă de topire a metanului la $-182,6^\circ\text{C}$ este de $14,5 \pm 0,5$ kcal/kg.
— Căldura latentă de vaporizare a metanului la -159°C , este de 138 kcal/kg (v. și tabela 57).

Tabela 57. Căldura latentă de vaporizare a metanului în kcal/kmol

T °K	λ	T °K	λ	T °K	λ	T °K	λ
100	2 048	120	1 917	145	1 721	170	1 382
105	2 015	125	1 883	150	1 670	175	1 276
110	1 983	130	1 847	155	1 612	180	1 141
111,5	1 972	135	1 808	160	1 546	185	939
115	1 950	140	1 767	165	1 470	191,03	0

— Entalpia metanului față de 0°K este dată în tabela 58 pentru presiuni joase (sub atmosferice, comportare de gaz perfect).

Tabela 58. Entalpia molară a metanului la presiune atmosferică, kcal/kmol °K

T	H	T	H	T	H	T	H
291,16	2 338	450	3 826	700	6 870	1 100	13 320
298,16	2 397	500	4 364	750	7 580	1 200	15 160
300	2 412	550	4 939	800	8 320	1 300	17 110
350	2 852	600	5 546	900	9 890	1 400	19 080
400	3 323	650	6 207	1 000	11 550	1 500	21 140

Entalpia metanului la presiuni înalte (gaz real), determinată experimental, este dată în tabelele 59, 60, 61.

Entalpia metanului la presiuni înalte, în funcție de raportul dintre greutatea specifică efectivă la presiunea respectivă și greutatea specifică la 0° și la 1 ata, este dată, în kcal/kmol, în tabela 60.

În tabela 61 sînt date valorile entalpiei metanului, calculate mai recent pe bază de date mai exacte, în kcal/kg, pentru un interval de temperaturi puțin mai restrîns.

Tabela 59. Entalpia metanului sub presiune, în kcal/kg față de 0°C

$t, ^\circ\text{C}$	$H - H_0$ la presiunea: (ata)										$t, ^\circ\text{C}$
	1	10	20	30	40	50	60	80	100	120	
-70	-46,0	-49,7	-54,8	-60,5	-67,6	-76,7	-	-	-	-	-70
-60	-41,6	-45,2	-49,8	-55,1	-61,1	-68,5	-77,8	-	-	-	-60
-50	-38,0	-40,2	-44,8	-50,0	-56,5	-61,4	-68,5	-	-	-	-50
-40	-32,7	-35,4	-39,7	-43,8	-48,1	-53,0	-58,2	-70,4	-	-	-40
-30	-28,0	-30,7	-34,4	-38,2	-42,0	-47,1	-50,4	-59,4	-67,6	-75,7	-30
-20	-22,4	-25,6	-29,0	-32,5	-35,8	-39,4	-43,1	-50,6	-58,5	-64,9	-20
-10	-18,0	-20,1	-23,8	-26,6	-29,7	-33,4	-36,4	-43,0	-50,1	-55,9	-10
0	-13,0	-15,1	-18,1	-21,2	-24,2	-27,3	-30,3	-36,1	-42,5	-48,4	0
10	-7,6	-9,6	-12,6	-15,2	-18,0	-20,8	-23,5	-29,0	-34,7	-40,3	10
20	-2,5	-4,2	-7,1	-9,6	-12,0	-14,8	-17,3	-22,2	-27,8	-32,8	20
30	+2,9	+1,2	-1,4	-3,7	-6,0	-8,5	-11,0	-15,6	-20,7	-25,1	30
40	8,4	7,0	+4,6	+2,1	+0,2	-1,9	-4,5	-8,5	-13,3	-17,4	40
50	14,0	12,5	10,2	8,1	6,1	+4,1	+2,1	-2,1	-6,1	-10,0	50
60	19,7	18,5	16,1	14,4	12,5	10,6	8,5	+4,7	+1,0	-2,6	60
70	25,5	24,5	22,3	20,5	18,7	16,7	15,1	11,5	8,0	+4,5	70
80	31,5	30,5	28,2	26,5	24,8	23,2	21,4	18,1	15,3	11,8	80
90	37,4	36,6	34,6	32,9	31,3	29,7	28,1	24,9	22,1	19,1	90
100	43,3	42,4	40,4	39,0	37,4	36,0	35,0	31,6	28,9	26,0	100
110	49,7	48,8	47,0	45,5	43,9	42,4	40,9	38,5	36,0	33,2	110
120	55,6	55,0	53,5	52,5	51,0	49,1	47,8	45,3	42,5	40,3	120
130	62,2	61,5	60,0	58,5	57,4	55,8	54,3	52,0	49,3	47,3	130
140	68,5	68,0	66,5	65,2	64,0	62,4	61,2	59,0	56,7	54,2	140
150	74,9	74,4	73,0	71,6	70,3	69,3	68,1	65,8	63,4	61,3	150
160	81,8	81,4	80,1	79,1	77,8	76,5	75,6	73,0	70,7	68,7	160
170	88,0	88,2	87,1	86,0	85,0	83,8	82,6	80,2	78,1	75,7	170
180	95,0	95,1	94,3	93,2	92,2	91,0	90,0	87,6	85,7	83,3	180
190	101,8	102,2	101,2	100,6	99,4	98,3	97,4	94,9	93,2	91,1	190
200	103,2	109,0	108,3	107,3	106,0	105,3	104,3	102,2	100,4	98,8	200

Pentru un calcul mai exact, în locul interpolării datelor din tabelele (58)–(60) se poate determina mai exact entalpia prin intergarea, de preferință grafic, a ecuației (131):

$$H_p - H^0 = \int_0^p \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP \quad (131)$$

luându-se valorile lui $(\partial H / \partial P)_T$ din tabela 62.

— Entropia metanului $S_p - S_0$, față de S_0 corespunzător la 1 ata și +25°C, este dată în tabela 63.

În funcție de greutatea specifică, exprimată prin raportul dintre cea efectivă și cea la 0°C și la 1 ata, entropia molară a metanului este dată în tabela 64.

— Coeficienții Joule-Thomson, definiții $\alpha = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$, la variația temperaturii prin detentă

Tabela 60. Entalpia metanului în kcal/kmol, în funcție de t° și raportul de creșterea densității față de acela la 0°C și 760 mm col. Hg

d	0°C	25°C	50°C	75°C	100°C	125°C	150°C
0	545	756	973	1195	1425	1664	1900
1	541	752	969	1192	1421	1661	1906
25	438	655	879	1107	1340	1582	1831
50	336	560	789	1023	1261	1508	1760
75	241	471	706	944	1188	1438	1695
100	151	386	627	872	1120	1374	1635
125	67	308	554	804	1057	1316	1581
150	-12	234	486	741	991	1263	1533
175	-85	166	424	683	947	1216	1492
200	-154	103	366	633	901	1177	1457
225	-217	46	315	587	863	1144	1420

adiabatică de 1°K, se pot calcula cu relația

$$\alpha = \frac{T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right) - V}{C_p} \quad (132)$$

Tabela 61. Entalpia metanului în funcție de temperatură și de presiune, în kcal/kmol

P , ata	21,11°C	37,78°C	54,44°C	71,11°C	87,78°C	104,44°C	121,11°C
0,00	2,9	11,8	21,0	30,2	39,7	49,4	59,3
6,80	1,6	10,4	19,6	29,0	38,6	48,5	58,5
13,61	0,1	9,0	18,3	27,8	37,6	47,5	57,6
20,41	-1,4	7,6	17,0	26,7	36,5	46,5	56,6
27,22	-3,3	6,1	15,7	25,5	35,4	45,5	55,7
34,02	-5,0	4,7	14,5	24,4	34,3	44,5	54,9
40,82	-7,2	3,1	13,1	23,1	33,2	43,5	53,9
54,32	-11,7	0,1	10,4	20,6	31,0	41,5	52,1
68,04	-16,0	-	7,8	18,4	28,9	39,6	50,4
85,05	-20,2	-6,6	4,6	15,5	26,3	37,2	48,3
102,06	-24,3	-10,1	1,5	12,8	23,8	35,0	46,2
136,08	-31,8	-16,8	-4,2	7,6	19,2	30,7	42,4
170,10	-38,1	-22,5	-9,2	3,0	14,9	26,9	38,8
204,12	-43,1	-27,2	-18,6	-1,0	11,1	23,4	35,7

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE SISTEMELOR FLUIDE

281

Tabela 62. Valorile raportului $(\partial H / \partial P)_T$ pentru metan

P, ata	21,11	37,78	54,44	71,11	87,78	104,44	121,11 °C	P, ata
0,00	0,215	0,194	0,176	0,159	0,146	0,133	0,121	0,00
34,02	0,247	0,221	0,197	0,178	0,162	0,148	0,133	34,02
68,04	0,249	0,220	0,194	0,172	0,154	0,140	0,127	68,04
102,06	0,234	0,207	0,177	0,158	0,143	0,129	0,118	102,06
136,08	0,204	0,183	0,159	0,143	0,131	0,119	0,109	136,08
170,10	0,166	0,152	0,138	0,128	0,119	0,109	0,098	170,10
204,12	0,123	0,121	0,116	0,109	0,103	0,094	0,084	204,12

Tabela 63. Entropia metanului în kcal/kg°C în funcție de temperatură și de presiune

t °C	$S_p - S_0$ la presiunea (în ata)										t °C
	1	10	20	30	40	50	60	80	100	120	
-70	-0,187	-0,482	-0,584	-0,653	-0,716	-0,778	-	-	-	-	-70
-60	-0,166	-0,460	-0,560	-0,627	-0,684	-0,739	-0,797	-	-	-	-60
-50	-0,145	-0,438	-0,537	-0,606	-0,658	-0,706	-0,754	-	-	-	-50
-40	-0,124	-0,416	-0,514	-0,577	-0,626	-0,669	-0,707	-0,786	-	-	-40
-30	-0,104	-0,396	-0,492	-0,553	-0,600	-0,640	-0,676	-0,741	-0,797	-0,842	-30
-20	-0,084	-0,375	-0,471	-0,530	-0,575	-0,613	-0,647	-0,705	-0,766	-0,799	-20
-10	-0,065	-0,355	-0,450	-0,508	-0,552	-0,590	-0,621	-0,675	-0,723	-0,762	-10
0	-0,046	-0,336	-0,429	-0,488	-0,532	-0,567	-0,598	-0,650	-0,695	-0,734	0
10	-0,027	-0,316	-0,409	-0,466	-0,509	-0,544	-0,574	-0,624	-0,667	-0,705	10
20	-0,009	-0,297	-0,390	-0,447	-0,488	-0,523	-0,552	-0,600	-0,643	-0,679	20
30	+0,009	-0,279	-0,371	-0,427	-0,468	-0,502	-0,531	-0,578	-0,619	-0,653	30
40	+0,027	-0,260	-0,352	-0,408	-0,448	-0,481	-0,510	-0,555	-0,595	-0,626	40
50	+0,044	-0,243	-0,334	-0,389	-0,429	-0,462	-0,489	-0,535	-0,572	-0,605	50
60	+0,061	-0,225	-0,316	-0,370	-0,410	-0,442	-0,470	-0,514	-0,551	-0,582	60
70	+0,079	-0,208	-0,298	-0,352	-0,392	-0,424	-0,450	-0,494	-0,530	-0,561	70
80	+0,096	-0,190	-0,281	-0,335	-0,374	-0,406	-0,432	-0,475	-0,509	-0,540	80
90	+0,112	-0,173	-0,264	-0,317	-0,356	-0,388	-0,414	-0,456	-0,490	-0,520	90
100	+0,129	-0,158	-0,247	-0,300	-0,339	-0,370	-0,396	-0,438	-0,472	-0,501	100
110	+0,145	-0,140	-0,231	-0,283	-0,311	-0,353	-0,379	-0,420	-0,453	-0,482	110
120	+0,160	-0,124	-0,214	-0,266	-0,304	-0,336	-0,362	-0,402	-0,436	-0,464	120
130	+0,176	-0,108	-0,198	-0,250	-0,287	-0,319	-0,345	-0,385	-0,419	-0,446	130
140	+0,192	-0,092	-0,182	-0,233	-0,271	-0,303	-0,328	-0,368	-0,401	-0,429	140
150	+0,208	-0,078	-0,166	-0,218	-0,256	-0,287	-0,312	-0,352	-0,385	-0,412	150
160	+0,224	-0,061	-0,149	-0,201	-0,238	-0,270	-0,294	-0,335	-0,368	-0,395	160
170	+0,238	-0,046	-0,133	-0,185	-0,222	-0,254	-0,278	-0,319	-0,351	-0,379	170
180	+0,252	-0,031	-0,118	-0,169	-0,205	-0,237	-0,262	-0,302	-0,334	-0,362	180
190	+0,268	-0,016	-0,102	-0,153	-0,189	-0,221	-0,246	-0,286	-0,319	-0,345	190
200	+0,283	-0,000	-0,087	-0,139	-0,176	-0,206	-0,231	-0,270	-0,302	-0,329	200

Tabela 64. Entropia molară a metanului $S_p - S_0$ în kcal/kmol°C, în funcție de raportul greutateilor specifice $d = \rho/\rho_0$, ρ_0 fiind luat la 0°C și la 1 ata

	0°C	25°C	50°C	75°C	100°C	125°C	150°C	
1	0,00	0,56	1,10	1,62	2,12	2,60	3,08	1
25	-6,55	-5,98	-5,43	-4,91	-4,41	-3,93	-3,45	25
50	-8,09	-7,51	-6,96	-6,43	-5,93	-5,44	-4,96	50
75	-9,06	-8,47	-7,91	-7,38	-6,87	-6,39	-5,90	75
100	-9,79	-9,20	-8,64	-8,09	-7,58	-7,10	-6,61	100
125	-10,40	-9,80	-9,23	-8,68	-8,17	-7,68	-7,20	125
150	-10,92	-10,32	-9,74	-9,19	-8,68	-8,19	-7,71	150
175	-11,39	-10,79	-10,20	-9,66	-9,14	-8,65	-8,16	175
200	-11,82	-11,22	-10,63	-10,08	-9,56	-9,07	-8,58	200
225	-12,22	-11,62	-11,03	-10,48	-9,96	-9,46	-8,97	225

Pentru calcule aproximative, v. și fig. 132

Tabela 65. Coeficienții Joule Thomson pentru metan în °K/at, în funcție de presiune și de temperatură

P, ata	200°K	250°K	300°K	350°K	400°K
1	0,88	0,58	0,41	0,30	0,23
5	0,85	0,57	0,40	0,30	0,22
25	0,73	0,51	0,37	0,28	0,21
50	0,62	0,46	0,34	0,26	0,20
100	0,46	0,37	0,28	0,22	0,17

Tabela 66. Coeficienții Joule Thomson pentru metan °K/at în funcție de presiune și temperatură

P, ata	21,1°C	37,8°C	54,4°C	71,1°C	87,8°C	104,4°C
0,00	0,405	0,359	0,318	0,283	0,253	0,227
17,01	0,425	0,375	0,333	0,298	0,267	0,239
34,02	0,425	0,376	0,334	0,299	0,268	0,241
51,03	0,410	0,365	0,324	0,290	0,259	0,233
68,04	0,389	0,346	0,306	0,272	0,243	0,219
85,05	0,362	0,322	0,284	0,251	0,223	0,199
102,06	0,332	0,294	0,258	0,229	0,202	0,180

Pentru metan, valorile lor sînt date în tabelele 67 și 65 pentru intervale mai largi de temperatură, respectiv în tabela 66, pentru intervale mai restrinse.

Pentru calcule aproximative, v. fig. 131 și urm.

Caracteristicile termodinamice ale metanului sînt date în tabela 68.

2) Etanul, C_2H_6 , greutatea moleculară — 30,048; greutatea specifică în condițiile standard — 1,349 kg/m³N sau 1,051 densitatea față de aer.

— Puncte caracteristice ale legii de stare:

Punctul critic:

$T = 305,40^\circ$; $K = 32,27^\circ C$;

$P = 48,2$ ata = 49,80 kg/cm² *);

$\gamma_2 = 203$ kg/m³; $v_c = 0,004928$ m³/kg =

= 4,928 cm³/g.

Punctul de topire la presiunea atmosferică:

$T = 90,13^\circ K = -183^\circ C$;

Punctul de fierbere la presiunea atmosferică:

$T = 184,13^\circ K = -89^\circ C$.

Indicele de refracție la presiunea atmosferică și la 0°C: $n_D = 1,000723$ (în stare gazoasă).

— Presiunea de vapori, în echilibru cu etanul lichid, este după diferiți cercetători:

Între 1 mm col. Hg și 760 mm col. Hg, determinată experimental asupra unui etan preparat prin electroliza acetatului de Na, ea este dată prin

$$\log P_{(mm)} = -\frac{1050,85}{T} + \quad (133)$$

$$+ 1,75 \log T - 0,01342 T + 7,10217.$$

*) După alte surse 48,64 ata = 50,28 kg/cm².

Între $-137^\circ C$ și $-77^\circ C$, ea poate fi calculată cu relația

$$\log P_{(at)} = -\frac{780,24}{T} + 4,2563 - \quad (134)$$

$$- 0,103 \cdot 10^{-3} T - 9,3 \cdot 10^{-10} (T - 238)^4$$

în care:

$P_{(mm)}$ este presiunea de vapori, în mm col. Hg;

T — presiunea de vapori, în ata;

$P_{(at)}$ — temperatura absolută, în °K.

Cu relațiile (134), (136) și (137) se calculează valorile din tabelele 70 și 71.

Pentru intervalul $-70^\circ C \dots +15^\circ C$, s-a propus:

$$\log P_{(at)} = -\frac{780,24}{T} + 4,2563 - \quad (135)$$

$$- 0,103 \cdot 10^{-3} T + 1,4 \cdot 10^{-11} (T - 238)^5$$

Mai ușoare, dar valabile pe intervale mici, sînt relațiile:

$$\log P_{(mm)} = 6,8188 - \frac{661,09}{256,50 + t} \quad (136)$$

valabilă între $-137,36^\circ C$ și $-88,63^\circ C$

$$\log P_{(at)} = 4,0955 - \frac{722,95}{265,15 + t} \quad (137)$$

valabilă între $-88,63^\circ C$ și $-29,88^\circ C$

$$\log P_{(at)} = 4,6728 - \frac{1030,63}{312,23 + t} \quad (138)$$

valabilă între $-29,88^\circ C$ și $+25,00^\circ C$.

Tabela 67. Coeficienții Joule Thomson pentru metan α , în °C/at, sub presiune

$t^\circ C$	Presiunea în at.										$t^\circ C$
	1	10	20	30	40	50	60	80	100	120	
-70	0,948	0,998	1,096	1,185	1,209	1,240	—	—	—	—	-70
-60	0,887	0,920	0,968	1,020	1,016	1,008	0,986	—	—	—	-60
-50	0,827	0,847	0,855	0,866	0,852	0,840	0,787	—	—	—	-50
-40	0,770	0,775	0,765	0,754	0,735	0,714	0,651	0,495	—	—	-40
-30	0,716	0,709	0,690	0,670	0,652	0,628	0,577	0,475	0,387	0,272	-30
-20	0,665	0,649	0,628	0,608	0,590	0,580	0,539	0,467	0,422	0,322	-20
-10	0,616	0,596	0,574	0,557	0,545	0,534	0,507	0,461	0,424	0,340	-10
0	0,570	0,548	0,527	0,514	0,503	0,493	0,469	0,440	0,403	0,339	0
10	0,525	0,503	0,485	0,472	0,461	0,450	0,431	0,406	0,375	0,324	10
20	0,484	0,463	0,447	0,433	0,422	0,412	0,397	0,375	0,348	0,305	20
30	0,445	0,425	0,410	0,398	0,388	0,378	0,365	0,347	0,323	0,289	30
40	0,407	0,390	0,377	0,366	0,358	0,349	0,338	0,321	0,300	0,273	40
50	0,374	0,359	0,348	0,339	0,331	0,324	0,312	0,297	0,279	0,258	50
60	0,344	0,330	0,320	0,314	0,307	0,300	0,290	0,275	0,260	0,244	60
70	0,316	0,305	0,298	0,290	0,284	0,279	0,270	0,256	0,244	0,230	70
80	0,292	0,284	0,276	0,271	0,266	0,260	0,252	0,240	0,229	0,218	80
90	0,274	0,265	0,259	0,254	0,250	0,244	0,237	0,226	0,216	0,207	90
100	0,256	0,249	0,244	0,239	0,235	0,230	0,224	0,215	0,206	0,197	100
110	0,243	0,236	0,231	0,226	0,222	0,218	0,213	0,205	0,197	0,188	110
120	0,229	0,224	0,220	0,215	0,211	0,207	0,202	0,196	0,189	0,180	120
130	0,219	0,214	0,209	0,205	0,201	0,197	0,194	0,187	0,180	0,172	130
140	0,210	0,205	0,200	0,196	0,193	0,189	0,184	0,179	0,172	0,165	140
150	0,200	0,196	0,192	0,188	0,185	0,181	0,177	0,172	0,165	0,157	150
160	0,193	0,189	0,184	0,180	0,176	0,173	0,170	0,164	0,157	0,150	160
170	0,185	0,181	0,177	0,173	0,169	0,165	0,161	0,155	0,150	0,144	170
180	0,178	0,174	0,170	0,166	0,162	0,158	0,154	0,149	0,144	0,136	180
190	0,170	0,167	0,163	0,159	0,155	0,150	0,146	0,141	0,136	0,130	190
200	0,164	0,160	0,156	0,151	0,148	0,143	0,139	0,134	0,129	0,123	200

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE SISTEMELOR FLUIDE

283

Tabela 68. Caracteristicile termodinamice ale metanolului

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P_{ata}	V_{m}	ρ_{m}	$\Delta = V \left(\frac{RT}{P} - 1 \right)$	$\frac{RT}{P}$	$\frac{T}{V} \left(\frac{RT}{P} \right)$	$\frac{P}{V} \left(\frac{RT}{P} \right)$	f	Caldura specifică cal/grad mol	α	$H_T - H^{\circ}_{273,13}$	$S_T - S^{\circ}_{273,13}$	$U_T - U^{\circ}_{273,13}$	$\hat{Z}_T - Z^{\circ}_{273,13}$	$F^{\circ}_T - F^{\circ}$
cm ³ /ml	mol/cm ³	cm ³ /mol	cm ³ /mol	cm ³ /mol	at	grad/at	cal/mol	grad/at	cal/mol	grad/mol	cal/mol	cal/mol	cal/mol	cal/mol
-100 °C														
10	1564	0,0006400	-97,50	103,2	1,191	1,10	9,42	8,6	0,986	-645	-7,24	-471	905	930
20	724,6	0,001380	-94,60	108,8	1,494	1,20	17,67	8,9	0,972	-708	-8,83	-516	1159	1212
30	440,3	0,002271	-91,35	115,3	1,935	1,35	24,79	10,8	0,937	-812	-8,90	-589	1380	1380
40	293,7	0,003405	-86,76	123,0	2,584	1,59	30,77	15,2	0,883	-940	-11,12	-682	1583	1502
50	197,9	0,005055	-80,41	132,5	3,452	2,06	35,04	18,3	0,805	-1070	-12,92	-767	1700	1606
60	128,4	0,007374	-68,79	142,0	4,636	2,41	39,04	20,1	0,710	-1201	-14,25	-840	1825	1700
70	85,4	0,010420	-46,62	152,4	6,140	3,01	43,70	21,6	0,474	-1427	-15,12	-921	1955	1807
80	56,8	0,01591	-33,95	163,8	8,036	3,83	47,14	16,5	0,308	-1642	-15,61	-1021	2090	1817
90	38,5	0,02392	-22,62	176,2	10,362	4,93	50,72	12,6	0,192	-1857	-15,92	-1121	2225	1825
100	25,1	0,03585	-13,54	189,6	13,145	6,33	54,38	10,7	0,113	-2072	-16,14	-1221	2360	1832
120	14,0	0,06192	-6,44	207,8	18,192	9,33	58,06	8,0	0,0641	-2287	-16,32	-1321	2495	1837
140	8,2	0,10188	-3,44	226,0	23,240	12,33	61,74	6,6	0,0392	-2502	-16,45	-1421	2630	1843
160	5,0	0,16187	-1,94	244,2	28,286	15,33	65,42	5,5	0,0273	-2717	-16,58	-1521	2765	1848
180	3,0	0,26182	-1,04	262,4	33,332	18,33	69,10	4,6	0,0190	-2932	-16,72	-1621	2900	1853
200	1,8	0,42177	-0,64	280,6	38,378	21,33	72,78	3,8	0,0130	-3147	-16,86	-1721	3035	1858
250	0,8	0,72172	-0,34	319,0	48,424	26,33	76,46	2,8	0,0060	-3362	-17,00	-1821	3170	1863
300	0,4	1,02166	-0,24	357,4	58,470	31,33	80,14	2,1	0,0035	-3577	-17,14	-1921	3305	1868
400	0,2	1,72161	-0,14	405,8	68,516	36,33	83,82	1,6	0,0022	-3792	-17,28	-2021	3440	1873
500	0,1	2,42156	-0,09	454,2	78,562	41,33	87,50	1,2	0,0014	-4007	-17,42	-2121	3575	1878
600	0,05	3,12151	-0,06	502,6	88,608	46,33	91,18	0,9	0,0009	-4222	-17,56	-2221	3710	1883
800	0,02	4,82146	-0,03	591,0	108,654	51,33	94,86	0,6	0,0002	-4437	-17,70	-2321	3845	1888
1000	0,01	6,52141	-0,02	679,4	128,700	56,33	98,54	0,5	0,0001	-4652	-17,84	-2421	3980	1893
-50 °C														
10	174,5	0,0005730	-80,70	85,80	1,151	1,05	9,54	8,6	0,776	-472	-6,45	-352	1000	1021
20	828,5	0,001207	-76,00	92,00	1,345	1,11	18,21	8,9	0,780	-532	-7,97	-392	1287	1329
30	521,1	0,001919	-70,18	98,20	1,639	1,13	26,03	10,0	0,774	-592	-9,10	-448	1574	1510
40	365,3	0,002734	-63,49	104,40	2,033	1,30	33,04	13,3	0,728	-652	-9,87	-500	1861	1640
50	271,4	0,003681	-57,26	110,60	2,427	1,42	39,24	16,5	0,682	-712	-10,65	-556	2148	1742
60	207,5	0,004820	-51,40	116,80	2,821	1,54	44,69	19,7	0,636	-772	-11,36	-612	2435	1827
80	128,2	0,007500	-45,78	123,00	3,615	1,86	53,44	16,2	0,563	-832	-12,57	-668	2722	1959
100	91,41	0,01094	-40,15	129,20	4,409	2,18	60,11	14,5	0,500	-892	-13,58	-724	3009	2038
120	76,30	0,01311	-34,52	135,40	5,203	2,50	66,78	12,8	0,437	-952	-14,35	-780	3296	2078
140	63,30	0,01455	-28,89	141,60	6,007	2,82	73,46	11,1	0,374	-1012	-14,88	-836	3583	2117
160	52,30	0,01555	-23,26	147,80	6,811	3,14	80,14	9,9	0,311	-1072	-15,47	-892	3870	2157
180	43,30	0,01652	-17,63	154,00	7,615	3,46	86,82	9,1	0,248	-1132	-15,51	-948	4157	2197
200	36,30	0,01698	-12,00	160,20	8,419	3,78	93,50	8,3	0,185	-1192	-15,72	-1004	4444	2237
250	21,30	0,01820	-7,37	172,40	10,023	4,40	102,3	6,6	0,122	-1252	-16,00	-1060	4731	2277
300	12,30	0,01910	-4,74	184,60	11,627	5,02	111,3	5,5	0,089	-1312	-16,33	-1116	5018	2317
400	6,30	0,02045	-3,35	196,80	13,231	5,64	120,3	4,6	0,066	-1372	-16,79	-1172	5305	2357
500	4,30	0,02145	-2,75	209,00	14,835	6,26	129,3	3,8	0,043	-1432	-17,17	-1228	5592	2397
600	3,30	0,02224	-2,15	221,20	16,439	6,88	138,3	3,1	0,031	-1492	-17,48	-1284	5879	2437
800	2,30	0,02347	-1,55	233,40	18,043	7,50	147,3	2,4	0,020	-1552	-17,84	-1340	6166	2477
1000	1,30	0,02446	-1,04	245,60	19,647	8,12	156,3	1,8	0,014	-1612	-18,38	-1396	6453	2517

Continuare tabela 68

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
- 25°C														
10	1968	0.0005081	-64.82	67.70	1.114	1.04	9.67	8.6	6.3	0.615	-	194	1.119	1.135
20	950.6	0.001052	-63.22	67.50	1.231	1.08	18.81	8.9	6.4	0.614	-	228	1.444	1.477
30	609.8	0.001640	-61.80	68.90	1.384	1.12	27.15	9.3	6.4	0.614	-	270	1.628	1.678
40	440.1	0.002272	-59.58	69.90	1.557	1.17	35.00	10.2	6.5	0.611	-	388	1.820	1.880
50	338.1	0.002958	-57.46	69.10	1.777	1.22	42.30	11.0	6.5	0.603	-	401	1.920	2.021
60	269.9	0.003705	-55.25	68.50	2.073	1.26	49.06	12.1	6.6	0.590	-	517	2.039	2.172
80	185.9	0.005379	-50.12	68.60	2.723	1.31	62.54	13.8	6.7	0.540	-	631	2.105	2.265
100	137.9	0.007252	-44.51	68.72	3.809	1.38	71.52	15.6	6.7	0.388	-	870	2.165	2.340
120	109.5	0.009132	-38.83	69.20	5.014	1.11	80.68	16.8	6.8	0.282	-	910	2.214	2.393
140	92.65	0.01079	-33.63	52.75	2.701	0.940	89.04	17.4	6.8	0.220	-	962	2.256	2.429
160	82.51	0.01212	-29.02	44.79	2.504	0.818	97.02	16.9	6.8	0.174	-	1017	2.284	2.458
180	75.62	0.01324	-25.10	37.58	2.136	0.711	104.8	14.9	6.8	0.140	-	1104	2.318	2.469
200	70.64	0.01416	-21.63	31.16	1.890	0.586	112.6	13.7	6.8	0.111	-	1264	2.431	2.535
250	63.72	0.01593	-14.17	18.27	1.461	0.470	139.3	12.6	6.8	0.0538	-	1571	2.618	2.894
300	58.72	0.01703	-7.82	9.15	1.200	0.381	153.9	11.8	6.9	0.0222	-	1885	2.744	2.862
400	53.44	0.01871	-2.64	-2.54	0.9124	0.355	202.4	10.9	6.9	0.0115	-	2388	3.066	3.297
500	50.21	0.01982	11.70	-3.86	0.7477	0.290	261.0	10.4	6.9	0.0094	-	2890	3.297	3.521
600	47.93	0.02086	19.76	-13.99	0.6456	0.265	331.6	10.3	7.0	0.0098	-	3369	3.521	3.745
800	44.85	0.02230	34.18	-19.40	0.5200	0.245	522.4	10.2	7.0	0.0511	-	4069	3.745	4.069
1 000	42.73	0.02340	46.93	-22.37	0.4471	0.235	801.9	10.0	7.1	0.0569	-	4869	3.971	4.295
0°C														
10	2 183	0.0004579	-52.45	57.90	1.090	1.04	9.75	8.6	6.5	0.496	-	20	1.236	1.250
20	1 067	0.0009372	-51.21	53.40	1.169	1.06	19.02	8.9	6.5	0.497	-	64	1.591	1.625
30	693.5	0.001442	-49.80	53.60	1.270	1.08	27.84	9.2	6.5	0.493	-	93	1.806	1.844
40	506.8	0.001973	-48.35	53.50	1.380	1.11	36.28	9.6	6.6	0.487	-	129	2.001	2.049
50	394.8	0.002513	-46.90	53.50	1.500	1.14	44.20	10.0	6.6	0.477	-	165	2.143	2.199
60	320.9	0.003118	-45.20	52.70	1.635	1.16	51.80	10.6	6.7	0.464	-	200	2.274	2.373
80	229.0	0.004367	-41.82	31.20	1.923	1.20	65.94	12.1	6.7	0.433	-	281	2.471	2.579
100	175.4	0.005701	-38.13	45.70	2.175	1.20	78.85	13.3	6.8	0.383	-	369	2.689	2.807
120	141.2	0.007080	-34.44	46.80	2.340	1.19	90.72	14.0	6.8	0.306	-	480	2.947	3.074
140	118.6	0.008430	-30.70	41.50	2.385	1.08	101.8	14.5	6.8	0.252	-	568	3.167	3.302
160	103.4	0.009675	-27.70	36.80	2.323	1.00	112.3	14.6	6.9	0.216	-	666	3.399	3.536
180	92.94	0.01076	-23.57	31.56	2.134	0.900	122.6	14.6	6.9	0.172	-	754	3.632	3.769
200	85.31	0.01172	-20.37	26.75	1.916	0.783	132.6	14.4	6.9	0.141	-	840	3.864	4.001
250	73.31	0.01364	-13.35	16.34	1.634	0.618	158.1	14.0	7.0	0.0760	-	914	4.096	4.233
300	66.44	0.01505	-7.34	8.27	1.344	0.502	184.6	13.4	7.0	0.0412	-	959	4.327	4.464
400	58.52	0.01709	-2.60	-2.49	1.028	0.432	243.3	12.4	7.1	0.0322	-	988	4.558	4.695
500	54.05	0.01850	11.12	-9.25	0.8580	0.339	319.8	11.9	7.2	0.0156	-	1012	4.789	4.926
600	51.09	0.01957	18.78	-13.73	0.7824	0.318	385.0	11.6	7.2	0.0081	-	1094	5.020	5.157
800	42.27	0.02116	32.50	-19.25	0.5790	0.284	611.2	11.2	7.3	0.0431	-	1159	5.251	5.388
1 000	44.72	0.02226	44.51	-22.31	0.4988	0.268	919.6	11.0	7.4	0.0502	-	1239	5.482	5.619
25°C														
10	2 404	0.0004159	-42.25	42.60	1.069	1.03	9.83	8.6	6.6	0.418	-	141	1.355	1.361
20	1 181	0.0008468	-41.20	42.60	1.130	1.05	19.31	8.9	6.7	0.418	-	106	1.574	1.575
30	77.4	0.001293	-40.10	42.10	1.266	1.06	28.47	9.1	6.7	0.477	-	77	1.984	2.014
40	569.8	0.001755	-38.95	41.80	1.372	1.08	37.32	9.4	6.7	0.42	-	41	2.145	2.185
50	448.0	0.002232	-37.70	41.30	1.472	1.09	45.87	9.7	6.8	0.404	-	9	2.267	2.317

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE SISTEMELOR FLUIDE

285

Continuare tabela 68

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
60	967,2	0,002723	36,49	40,59	1,418	1,10	54,14	10,0	6,8	0,392	21	21	2,365	2,424
80	267,0	0,002748	33,80	38,80	1,610	1,13	68,89	10,6	6,9	0,370	88	88	2,516	2,592
100	207,9	0,004810	31,20	36,74	1,761	1,13	84,71	11,2	6,9	0,343	151	151	2,630	2,719
120	169,6	0,006895	28,75	34,25	1,914	1,17	98,76	11,9	6,9	0,301	208	208	2,721	2,822
140	143,5	0,008970	25,70	31,24	2,067	1,22	112,2	12,9	6,9	0,278	278	278	2,810	2,906
160	124,7	0,009020	23,00	28,20	2,220	1,27	125,7	13,5	7,0	0,229	338	338	2,861	2,971
180	110,9	0,009020	20,42	25,01	2,373	1,32	137,7	14,1	7,0	0,188	385	385	2,918	3,027
200	100,7	0,009930	17,80	21,62	2,526	1,37	150,1	14,3	7,0	0,158	444	444	2,969	3,074
250	84,32	0,01186	11,66	13,54	2,679	1,42	172,7	14,0	7,1	0,0930	500	500	3,050	3,162
300	74,82	0,01336	6,17	8,73	2,832	1,46	195,0	13,5	7,2	0,0665	545	545	3,176	3,225
400	64,28	0,01556	3,28	4,73	3,085	1,50	218,9	12,6	7,4	0,0126	651	651	3,343	3,413
500	58,42	0,01712	1,93	2,86	3,338	1,54	243,8	12,3	7,4	0,00780	761	761	3,490	3,578
600	54,63	0,01830	1,19	1,86	3,591	1,58	268,6	12,1	7,5	0,0215	850	850	3,627	3,726
800	49,75	0,02010	0,63	1,17	3,844	1,62	293,4	11,7	7,6	0,0387	921	921	3,878	3,978
1000	46,71	0,02141	0,47	0,85	4,097	1,66	318,2	11,5	7,6	0,0464	1003	1003	4,111	4,211
50°C														
10	2018	0,0003519	33,80	33,80	1,049	1,03	9,87	8,8	6,8	0,364	393	393	1,470	1,478
20	1292,1	0,0007740	33,88	33,80	1,106	1,04	19,50	8,8	6,9	0,360	275	275	1,907	1,924
30	851,1	0,001175	31,90	32,77	1,158	1,05	28,88	9,2	6,9	0,356	254	254	2,160	2,183
40	630,1	0,001587	30,95	32,80	1,216	1,06	38,08	9,4	6,9	0,349	236	236	2,356	2,388
50	498,5	0,002006	30,00	31,80	1,271	1,06	46,97	9,7	6,9	0,341	201	201	2,472	2,510
60	410,8	0,002434	28,95	31,10	1,307	1,06	55,70	10,0	7,0	0,332	176	176	2,581	2,626
80	301,9	0,003312	24,90	29,50	1,440	1,06	72,58	10,3	7,0	0,311	120	120	2,751	2,808
100	237,5	0,004211	21,80	27,66	1,537	1,08	88,79	10,8	7,0	0,288	63	63	2,881	2,948
120	195,4	0,005118	19,26	25,66	1,640	1,13	104,4	11,2	7,1	0,264	43	43	2,985	3,059
140	166,1	0,006020	17,03	23,30	1,696	1,11	119,7	11,6	7,1	0,240	38	38	3,072	3,151
160	144,8	0,006906	14,89	20,92	1,734	1,01	134,4	12,0	7,2	0,214	66	66	3,147	3,228
180	128,8	0,007764	12,89	18,51	1,757	0,990	149,0	12,4	7,2	0,189	131	131	3,213	3,294
200	116,7	0,008569	11,16	16,88	1,732	0,931	163,4	12,6	7,2	0,165	162	162	3,272	3,349
250	96,38	0,01038	8,80	15,88	1,616	0,795	199,4	13,1	7,3	0,104	281	281	3,400	3,459
300	84,12	0,01189	7,44	14,87	1,435	0,661	236,1	13,2	7,4	0,0675	359	359	3,509	3,540
400	70,47	0,01419	4,44	11,95	1,153	0,462	315,1	12,6	7,6	0,0207	495	495	3,694	3,654
500	63,08	0,01585	2,86	10,05	0,9779	0,458	404,8	12,4	7,7	0,00278	690	690	3,855	3,783
600	58,33	0,01714	1,92	8,86	0,8448	0,420	508,6	12,3	7,8	0,0178	881	881	4,001	3,908
800	52,49	0,01905	1,14	7,85	0,6728	0,359	772,2	12,0	7,8	0,0357	1003	1003	4,270	3,895
1000	48,54	0,02048	0,83	7,00	0,5604	0,332	1129	11,8	7,9	0,0442	1156	1156	4,513	3,973
100°C														
10	3040	0,0003257	20,80	22,40	1,034	1,03	9,94	9,4	7,4	0,365	854	854	1,708	1,709
20	1508	0,0063310	21,60	21,70	1,073	1,04	19,71	9,5	7,4	0,260	640	640	2,211	2,222
30	1000	0,010000	20,59	20,65	1,098	1,05	29,36	9,7	7,4	0,255	624	624	2,507	2,622
40	745,2	0,01342	19,75	20,27	1,136	1,04	38,88	9,8	7,4	0,249	601	601	2,715	2,735
50	593,5	0,01685	18,51	18,88	1,170	1,04	48,30	10,0	7,4	0,242	577	577	2,876	2,899
60	491,6	0,02034	17,90	18,72	1,195	1,03	57,60	10,2	7,4	0,234	557	557	3,007	3,034
80	365,2	0,02731	15,92	16,54	1,258	1,02	75,92	10,5	7,4	0,219	510	510	3,213	3,245
100	291,1	0,03435	14,35	15,19	1,314	1,02	93,91	10,8	7,5	0,204	475	475	3,371	3,407
120	241,5	0,04139	12,83	13,56	1,356	1,01	111,6	11,1	7,5	0,189	433	433	3,499	3,539
140	206,5	0,04840	11,44	12,11	1,396	1,00	129,4	11,3	7,6	0,175	394	394	3,608	3,650
160	181,0	0,05525	9,81	11,37	1,396	1,00	146,5	11,5	7,6	0,159	358	358	3,701	3,741
180	161,4	0,06196	8,26	9,70	1,427	0,980	163,8	11,8	7,6	0,145	320	320	3,783	3,822

Continuare tabela 68

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
200	146.2	0.006840	—	6.58	6.90	1.436	0.940	181.5	11.9	7.6	0.130	—	283	3.860	3.893
250	119.5	0.008369	—	2.90	2.93	1.413	0.825	225.0	12.2	7.7	0.0980	—	195	4.019	4.037
300	102.7	0.009737	—	0.63	0.64	1.353	0.675	269.5	12.3	7.8	0.0713	—	326	4.154	4.150
400	83.45	0.01198	7.53	6.90	1.171	0.675	365.1	12.4	8.0	0.0279	—	2.4	4.379	4.313	
500	72.83	0.01373	13.80	—	11.59	0.680	470.4	12.4	8.1	0.00426	—	90	4.567	4.428	
600	66.08	0.01513	19.49	—	15.05	0.6034	589.9	12.3	8.2	0.0126	—	157	4.735	4.519	
800	57.98	0.01725	29.85	—	19.72	0.7275	879.8	12.0	8.3	0.0318	—	267	5.032	4.653	
1 000	53.12	0.01882	39.04	—	22.50	0.6167	0.400	1 263	11.8	8.4	0.0420	—	340	5.300	4.760

150°C

10	34.60	0.0002890	—	11.14	12.00	1.028	1.02	9.97	10.0	8.0	0.196	—	1 050	1.933	1.937
20	1726	0.0005795	—	10.60	10.50	1.051	1.01	19.87	10.0	8.0	0.190	—	1 325	2.517	2.517
30	1 147	0.0008720	—	10.40	10.60	1.068	1.01	29.72	10.0	8.0	0.184	—	1 013	2.852	2.860
40	858.4	0.001165	—	9.50	9.60	1.092	1.01	39.50	10.2	8.0	0.178	—	996	3.091	3.101
50	684.9	0.001460	—	9.60	9.50	1.106	1.01	49.24	10.3	8.0	0.174	—	1 267	3.298	3.298
60	570.1	0.001754	—	8.40	8.60	1.126	1.01	58.94	10.4	8.1	0.170	—	981	3.426	3.440
80	426.6	0.002344	—	7.40	7.42	1.168	1.00	78.21	10.7	8.1	0.156	—	926	3.666	3.680
100	340.7	0.002935	—	6.40	6.52	1.201	1.00	97.36	10.9	8.1	0.152	—	898	3.860	3.860
120	284.0	0.003521	—	5.25	5.35	1.223	1.00	116.4	11.1	8.1	0.140	—	866	4.000	4.016
140	243.9	0.004100	—	4.45	4.11	1.247	1.00	135.5	11.4	8.1	0.128	—	835	4.128	4.142
160	214.2	0.004685	—	3.81	2.81	1.267	0.985	154.5	11.6	8.2	0.117	—	804	4.238	4.249
180	191.3	0.005227	—	2.78	1.60	1.281	0.961	173.6	11.8	8.2	0.108	—	774	4.336	4.343
200	173.3	0.005770	0.31	0.51	1.273	0.928	0.840	192.8	11.9	8.2	0.0975	—	745	4.424	4.426
250	141.4	0.007070	5.49	5.26	1.269	0.840	241.4	19.2	8.2	0.0754	—	602	4.771	4.733	
300	121.0	0.008264	10.80	9.72	1.235	0.818	291.3	12.3	8.3	0.0558	—	498	5.029	4.935	
400	96.52	0.01036	10.80	9.72	1.137	0.759	395.7	12.4	8.4	0.0257	—	409	5.245	5.082	
500	82.92	0.01206	16.09	—	1.022	0.670	511.4	12.4	8.6	0.00510	—	338	5.454	5.215	
600	74.28	0.01346	21.06	—	0.9268	0.620	655.8	12.3	8.6	0.0107	—	296	5.764	5.376	
800	63.44	0.01567	29.98	—	0.7730	0.510	948.9	12.0	8.8	0.0290	—	236	5.764	5.376	
1 000	57.68	0.01734	38.13	—	22.96	0.465	1 274	11.8	8.9	0.0403	—	126	6.012	5.456	

200°C

10	3.879	0.0002578	—	4.50	3.50	1.016	1.00	9.99	10.7	8.7	0.143	—	1 474	2.164	2.165
20	1 938	0.0005160	—	3.50	3.25	1.036	1.00	19.96	10.7	8.7	0.139	—	1 460	2.816	2.816
30	1 290	0.0007752	—	4.00	3.87	1.046	1.00	29.92	10.7	8.7	0.135	—	1 841	3.195	3.198
40	968.0	0.001033	3.19	2.62	2.62	1.060	1.00	39.86	10.8	8.7	0.132	—	1 826	3.444	3.444
50	774.0	0.001292	2.63	2.50	2.50	1.074	1.00	49.80	10.9	8.7	0.128	—	1 891	3.674	3.678
60	644.7	0.001551	2.39	2.38	2.38	1.088	1.00	59.72	10.9	8.7	0.125	—	1 416	3.849	3.849
80	484.0	0.002065	1.98	1.31	1.31	1.113	1.00	79.55	11.1	8.7	0.119	—	1 403	3.845	3.845
100	388.0	0.002577	0.165	0.96	0.96	1.135	1.00	99.40	11.2	8.8	0.112	—	1 375	4.127	4.130
120	324.5	0.003082	0.941	—	0.88	1.154	1.00	119.3	11.4	8.8	0.105	—	1 345	4.324	4.325
140	279.2	0.003474	2.70	—	1.88	1.171	1.00	139.3	11.5	8.8	0.0980	—	1 319	4.496	4.496
160	245.4	0.003860	2.60	2.74	2.74	1.188	0.975	159.4	11.7	8.8	0.0910	—	1 292	4.642	4.635
180	219.3	0.004260	3.63	3.61	3.61	1.191	0.940	179.6	11.8	8.8	0.0840	—	1 266	4.768	4.768
200	198.6	0.004650	4.58	4.48	4.48	1.176	0.894	200.0	11.9	8.8	0.0780	—	1 241	4.891	4.865
250	162.1	0.005169	7.08	6.80	6.80	1.179	0.850	251.9	12.2	8.9	0.0600	—	1 217	4.982	4.960
300	138.2	0.005737	9.36	8.80	8.80	1.148	0.840	305.5	12.3	9.0	0.0450	—	1 152	5.158	5.158
400	109.5	0.006132	14.03	12.44	12.44	1.093	0.799	419.1	12.4	9.0	0.0199	—	1 079	5.380	5.316
500	93.03	0.01075	18.43	15.38	15.38	1.012	0.752	543.8	12.1	9.1	0.00220	—	985	5.677	5.557
600	82.47	0.01213	22.64	17.76	17.76	0.9317	0.720	682.4	12.3	9.2	0.0102	—	904	5.922	5.736
800	69.72	0.01434	30.44	23.19	23.19	0.8042	0.580	1 004	12.0	9.3	0.0274	—	835	6.136	5.878
1 000	62.30	0.01605	37.67	21.46	21.46	0.6987	0.535	1 407	11.8	9.4	0.0387	—	711	6.499	6.089
1 000	62.30	0.01605	37.67	21.46	21.46	0.6987	0.535	1 407	11.8	9.4	0.0387	—	711	6.499	6.089

— Legea de stare $F(P, v, T) = 0$ a etanului, determinată sub forma relației (121), are coeficienții:

$$B_0 = 0,0627724; \quad A_0 = 4,15555;$$

$$C_0 = 10^6 \cdot 1,179592; \quad b = 0,0111220;$$

$$a = 0,345160; \quad C = 32767; \quad \gamma = 0,01180;$$

$$\alpha = 0,000243389$$

în intervalul

$$+ 25^\circ\text{C} < t < + 275^\circ\text{C};$$

după alți autori, valorile respective sînt:

$$B_0 = (0,497426)^3; \quad A_0 = 2,03852)^2;$$

$$C_0 = (423,783)^2; \quad b = (0,223217)^3;$$

$$a = (0,701466)^3; \quad C = (31,9997)^3;$$

$$\gamma = (0,108628)^2 \text{ și } \alpha = (0,062436)^2.$$

Sub forma ecuației (122), coeficienții ei sînt:

$$A_0 = 5\,880; \quad B_0 = 0,9040; \quad a = 0,05861;$$

$$b = 0,61915; \quad C = 90 \cdot 10^2.$$

Sub forma ecuației (123) coeficienții ei sînt:

$$A_0 = 5,049; \quad B_0 = 0,07658; \quad a = 0,03104;$$

$$b = -0,04298 \text{ și } C = 1,46 \cdot 10^5.$$

Sub forma (16), coeficienții au valorile:

$$a = 0,00922; \quad b = 0,00284.$$

Tabela 69. Presiunea de vapori a etanului între $-137^\circ\text{C} \dots -73^\circ\text{C}$ în ata, respectiv mm col. Hg.

$t, ^\circ\text{C}$	P absolută mm col. Hg	P calculată după ecuația		ΔP față de ecuația		ΔP față de ecuația	
		134 mm col. Hg	136 mm col. Hg	134 mm col. Hg (ata)	%	136 mm col. Hg (ata)	%
-137,364	18,62	18,77	18,62	-0,15	-0,81	0,00	0,00
-125,776	57,68	57,91	57,79	-0,23	-0,40	-0,11	-0,19
-118,554	106,40	106,55	106,31	-0,15	-0,14	+0,09	+0,08
-114,715	143,33	143,64	143,33	-0,31	-0,22	0,00	0,00
-110,471	195,55	196,23	195,81	-0,68	-0,35	-0,26	-0,13
-107,571	240,16	240,31	239,88	-0,15	-0,06	+0,28	+0,12
-105,264	280,67	280,81	280,35	-0,14	-0,05	+0,32	+0,11
-103,925	306,51	306,73	306,23	-0,22	-0,07	+0,28	+0,09
-101,400	360,46	360,77	360,24	-0,31	-0,09	+0,22	+0,06
-99,038	417,84	417,92	417,37	-0,08	-0,02	+0,47	+0,11
-97,392	461,54	461,78	461,27	-0,24	-0,05	+0,37	+0,08
-95,477	517,10	517,33	516,85	-0,23	-0,04	+0,25	+0,05
-94,479	549,96	548,34	547,84	-0,38	-0,07	+0,12	+0,02
-93,350	584,81	585,04	584,64	-0,23	-0,04	+0,15	+0,03
-91,594	645,91	646,00	645,71	-0,09	-0,01	+0,20	+0,03
-90,637	681,18	681,26	681,02	-0,08	-0,01	+0,16	+0,03
-89,322	732,18	732,10	732,01	+0,08	+0,01	+0,17	+0,02
-88,630	—	760,00	760,00	—	—	—	—
-88,561	ata	ata (134)	ata (136)	ata (134)	ata (136)	ata (136)	ata (136)
-87,963	1,0040	1,0038	1,0037	+0,0002	+0,02	+0,0003	+0,03
-87,186	1,0366	1,0365	1,0361	+0,0001	+0,01	+0,0005	+0,05
-80,814	1,0800	1,0803	1,0795	-0,0003	-0,03	+0,0005	+0,05
-73,191	1,4974	1,4953	1,4916	+0,0021	+0,14	+0,0058	+0,39
	2,1441	2,1417	2,1349	+0,0024	+0,11	+0,0092	+0,45

Tabela 70. Presiunea de vapori a etanului între $-88,63^\circ\text{C}$ și $+15,16^\circ\text{C}$

$t, ^\circ\text{C}$	P absolută, ata	P calculată, în ata		ΔP după (135)		ΔP după (136), (137)	
		după (135)	după (136) și (137)	ata	%	ata	%
-88,63	—	—	1,000	—	—	—	—
-69,61	2,496	2,491	2,502	+0,005	+0,20	-0,006	-0,24
-67,48	2,733	2,730	2,743	+0,003	+0,11	-0,10	-0,37
-62,14	3,414	3,403	3,423	+0,011	+0,32	-0,009	-0,26
-56,79	4,225	4,236	4,225	-0,011	-0,26	0,000	0,00
-51,22	5,207	5,211	5,202	-0,004	-0,08	+0,005	+0,10
-48,00	5,838	5,846	5,838	-0,008	-0,14	0,000	0,00
-46,92	6,073	6,073	6,064	0,000	0,00	+0,009	+0,15
-38,52	8,044	8,054	8,045	-0,010	-0,12	-0,001	-0,01
-34,20	9,229	9,242	9,230	-0,013	-0,14	-0,001	0,01
-29,88	10,536	10,550	10,536	-0,014	-0,13	0,000	0,00
-24,5	—	după (137)	—	—	—	după (137)	—
-20,07	12,354	12,381	12,346	-0,027	-0,22	+0,008	+0,06
-14,30	14,043	14,017	13,973	+0,026	+0,19	+0,070	+0,50
-9,82	16,421	16,401	16,351	+0,020	+0,12	+0,070	+0,43
-4,37	18,448	18,439	18,399	+0,009	+0,05	+0,049	+0,27
-0,01	21,185	21,162	21,141	+0,023	+0,11	+0,044	+0,21
+5,74	23,544	23,541	23,544	+0,003	+0,01	0,000	0,00
+10,48	26,837	26,910	27,013	-0,073	-0,27	-0,176	-0,66
+15,16	30,106	30,097	30,004	+0,009	+0,03	+0,102	+0,34
	33,468	33,457	33,483	+0,011	+0,03	-0,015	-0,04

Pentru problemele curente este preferabil să se determine $F(P, v, T) = 0$, fie din tabele cu date experimentale ca tabela 71, fie pe baza legii $P \cdot v = RTZ$, în care Z poate fi luat fie din tabela 72, fie din fig 109–110.

— Viscositatea etanului în starea gazoasă, la presiuni joase, funcție independentă de presiune, este dată în tabela 73 și corespunde aproximativ legii

$$\mu = 106,0 \cdot 10^{-7} \frac{T}{T + 280^\circ} \quad (139)$$

în care:

μ este viscozitatea absolută a etanului gazos, în poise;

T — temperatura, în $^\circ K$,

cu o eroare de ordinul $\pm 2 \cdot 10^{-7}$ poise.

Pentru variația viscozității în funcție de temperatură se poate folosi și abaca dată în fig. 105.

Din cauza apropierii domeniului critic, chiar la presiuni moderate (≈ 10 at), constanța viscozității în funcție de presiune nu se mai

Tabela 71. Volumul specific al etanului în funcție de presiune (ata) și temperatură ($^\circ C$) în cm^3/g , dm^3/kg

P, ata	Volumul specific în cm^3/g la temperatura în $^\circ C$										P, ata
	21,1	25,6	32,2	37,8	43,3	54,4	71,1	87,8	104,4	121,1	
La saturație: Vapori	10,91	8,60	—	—	—	—	—	—	—	—	La saturație: Vapori
Lichid	2,973	3,224	4,17	—	—	—	—	—	—	—	Lichid
1,000	795,7	811,0	826,4	841,9	857,0	887,8	933,8	979,9	1025,7	1072,2	1,000
1,361	583,2	584,5	605,9	617,3	628,4	651,2	685,2	719,3	753,0	787,4	1,361
2,722	288,5	294,3	300,1	305,8	311,5	323,2	340,5	357,8	375,0	392,3	2,722
4,082	190,3	194,2	198,2	202,1	205,9	213,8	219,3	237,3	248,9	260,6	4,082
6,804	111,54	114,02	116,51	118,97	121,43	126,4	133,7	141,0	148,1	155,1	6,804
10,21	72,16	73,88	75,61	77,37	79,09	82,56	87,67	92,78	97,77	102,40	10,21
13,61	52,34	53,71	55,10	56,48	57,84	60,59	64,60	68,52	72,32	76,02	13,61
17,01	40,31	41,54	42,75	43,93	45,08	47,34	50,74	54,00	57,14	60,21	17,01
20,41	32,23	33,33	34,41	35,47	36,49	38,49	41,44	44,28	46,98	49,61	20,41
27,22	21,97	22,89	23,86	24,81	25,68	27,38	29,82	32,08	34,27	36,35	27,22
34,02	15,03	16,18	17,20	18,19	18,98	20,60	22,79	24,77	26,60	28,36	34,02
40,82	2,911	10,87	12,28	13,43	14,33	15,95	18,00	19,84	21,48	22,97	40,82
47,63	2,805	3,048	7,267	9,546	10,709	12,46	14,54	16,29	17,81	19,15	47,63
54,43	2,736	2,904	3,208	4,616	7,443	9,733	11,900	13,62	15,06	16,32	54,43
68,04	2,638	2,748	2,912	3,153	3,519	5,524	8,108	9,843	11,222	12,369	68,04
85,05	2,555	2,634	2,747	2,886	3,060	3,620	5,232	6,860	8,219	9,266	85,05
102,1	2,493	2,557	2,645	2,746	2,864	3,181	4,002	5,143	6,308	7,260	102,1
119,1	2,444	2,506	2,573	2,648	2,738	2,972	3,489	4,230	5,135	5,932	119,1
136,1	2,400	2,454	2,512	2,576	2,653	2,837	3,216	3,737	4,411	5,059	136,1
153,1	2,368	2,411	2,461	2,520	2,586	2,743	3,049	3,444	3,951	4,473	153,1
170,1	2,337	2,376	2,421	2,473	2,533	2,671	2,926	3,238	3,645	4,069	170,1
187,1	2,309	2,345	2,385	2,432	2,486	2,611	2,836	3,093	3,428	3,786	187,1
204,1	2,280	2,315	2,351	2,395	2,445	2,563	2,761	2,992	3,269	3,573	204,1
221,1	—	—	—	—	—	2,523	2,698	2,914	3,146	3,411	221,1
238,1	—	—	—	—	—	2,490	2,660	2,841	3,042	3,269	238,1

Tabela 72. Valoarea coeficienților de abatere dela legea gazelor perfecte, Z pentru etan

P, ata	Valoarea la temperatura, în $^\circ C$							P, ata
	37,78	71,11	104,44	137,78	171,11	204,44	237,78	
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,00
13,61	0,9057	0,9328	0,9508	0,9635	0,9728	0,9798	0,9853	13,61
27,22	0,7921	0,8594	0,8999	0,9267	0,9461	0,9602	0,9713	27,22
40,82	0,6411	0,7784	0,8476	0,8900	0,9201	0,9414	0,9580	40,82
54,43	0,2935	0,6878	0,7939	0,8541	0,8950	0,9236	0,9455	54,43
68,04	0,2571	0,5881	0,7394	0,8194	0,8712	0,9071	0,9340	68,04
102,06	0,3387	0,4391	0,6242	0,7440	0,8200	0,8722	0,9100	102,06
119,07	0,3820	0,4500	0,5939	0,7175	0,8010	0,8591	0,9006	119,07
136,08	0,4256	0,4753	0,5845	0,7010	0,7877	0,8494	0,8937	136,08
153,09	0,4671	0,5081	0,5915	0,6954	0,7807	0,8438	0,8898	153,09
170,10	0,5106	0,5426	0,6083	0,6979	0,7788	0,8419	0,8887	170,10
187,11	0,5520	0,5778	0,6314	0,7073	0,7827	0,8441	0,8903	187,11
204,12	0,5930	0,6134	0,6579	0,7218	0,7908	0,8494	0,8943	204,12
238,14	0,6757	0,6846	0,7158	0,7632	0,8162	0,8683	0,9099	238,14
272,16	0,7565	0,7563	0,7771	0,8114	0,8531	0,8957	0,9334	272,16
306,2	0,8362	0,8285	0,8398	0,8639	0,8955	0,9296	0,9619	306,2
340,2	0,9154	0,9004	0,9030	0,9184	0,9418	0,9674	0,9951	340,2
408,2	1,0714	1,0423	1,0287	1,0288	1,0387	1,0518	1,0658	408,2
476,3	1,2219	1,1793	1,1548	1,1439	1,1404	1,1430	1,1477	476,3
544,3	1,3688	1,3134	1,2799	1,2576	1,2431	1,2365	1,2332	544,3
612,4	1,5129	1,4454	1,4016	1,3698	1,3461	1,3309	1,3188	612,4
680,4	1,6530	1,5770	1,5211	1,4799	1,4488	1,4250	1,4050	680,4

verifică. În tabela 74 sînt date viscozitățile etanului în starea lichidă și în cea gazoasă.

Se poate observa comportarea continuă a fazei fluide încă de la temperatura de + 40°C.

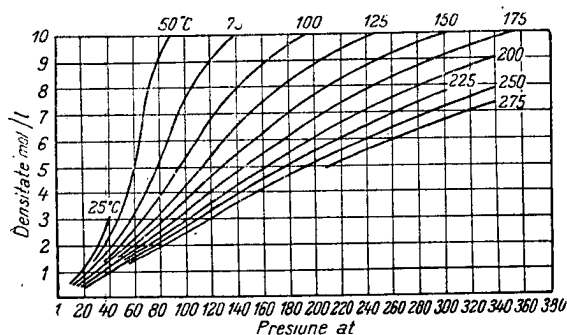


Fig. 108. Densitatea molară a etanului în faza gazoasă, în gama presiunilor de zăcămint.

Tabela 73. Viscositatea etanului gazos în funcție de temperatură, între 0°C și 100°C, la presiunea atmosferică

$t, ^\circ\text{C}$	$10^7 \cdot \mu$	$t, ^\circ\text{C}$	$10^7 \cdot \mu$
0	865	60	1051
20	928	70	1080
30	960	80	1109
40	991	90	1143
50	1016	100	1171

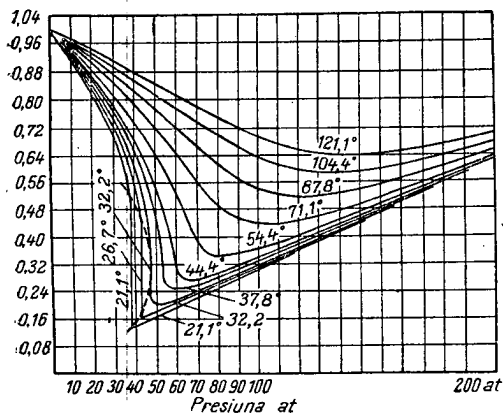


Fig. 109. Coeficienții de abatere ai etanului de la legea gazelor perfecte.

— Fugacitate-activitate (definiții, v. Cap. IV. A. e). Fugacitatea etanului, în at, în funcție de presiune și de temperatură este dată în tabela 75.

— Coeficienții de echilibru ai etanului, funcții de temperatură și de presiune, se deose-

besc de la sistem la sistem, din cauza influenței restului sistemului. În primă aproximație, ei pot fi considerați independenți de compoziția restului sistemului și se pot folosi diagramele date în fig. 111 și 112.

— Căldura specifică sub presiune constantă, C_p , la presiunea atmosferică a etanului exprimativ între 298,16°K și 1000°K cu relațiile (140 — 145) (v. tabela 76).

$$C_p = 2,247 + 38,201 \cdot 10^{-3} T - 110,49 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (140)$$

sau

$$C_p = 1,074 + 43,561 \cdot 10^{-3} T - 178,91 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,581 \cdot 10^{-9} T^3 \quad (141)$$

unde:

C_p este căldura specifică molară în kcal/kmol·°K;

T — temperatura absolută, în °K;

sau:

$$C_p = 0,0737 + 1,254 \cdot 10^{-3} T \times 3,625 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (142)$$

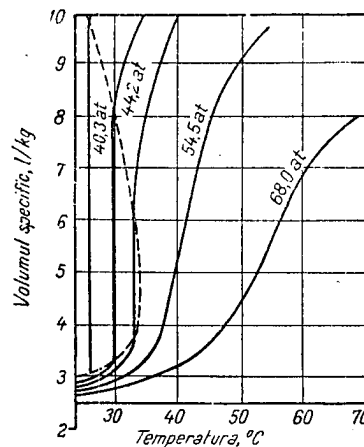


Fig. 110. Volumul specific al etanului în funcție de temperatură și de presiune.

sau:

$$C_p = 0,03525 + 1,430 \cdot 10^{-3} T - 5,865 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,088 \cdot 10^{-9} T^3 \quad (143)$$

unde:

C_p este căldura specifică în kcal/kg °K;

sau:

$$C_p = 0,0774 + 1,318 \cdot 10^{-3} T - 3,810 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (144)$$

sau

$$C_p = 0,03705 + 1,505 \cdot 10^{-3} T - 6,160 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,0925 \cdot 10^{-3} T^3 \quad (145)$$

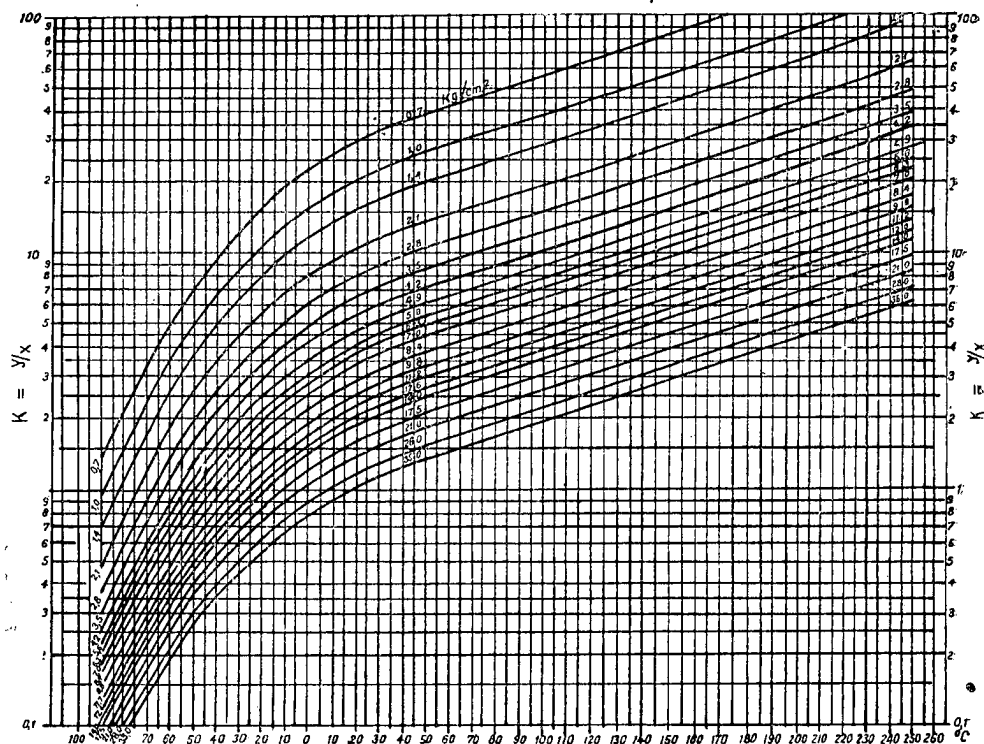


Fig. 111. Valorile coeficienților de echilibru ai etanului în funcție de presiune și de temperatură. Date aproximative în domeniul (P, T) extins și făcând abstracție de compoziția restului sistemului.

Tabela 74. Viscositatea etanului în faza vâpori și faza lichidă, în funcție de presiune și temperatură

P, ata	Viscozitatea, $10^6 \times \mu$ la temperatura în °C												P, ata
	15	20	30	40	50	60	75	100	125	150	175	200	
6,80	91,7	91,6	94,6	97,4	100,2	102,8	107,6	114,3	121,4	128,2	135,2	141,9	6,80
13,61	94,2	92,0	95,1	98,0	100,5	103,0	107,6	114,3	121,6	128,2	135,8	143,2	13,61
20,41	97,9	92,9	96,4	99,1	100,9	103,8	108,2	114,3	121,6	128,2	135,8	144,0	20,41
27,22	105,1	95,1	98,2	100,2	101,6	103,8	108,6	114,6	121,6	128,2	136,2	145,2	27,22
34,02	—	114,0	104,7	104,7	104,7	105,7	110,5	114,8	121,9	128,3	136,8	146,9	34,02
40,82	437,5	393,6	120,2	115,6	113,5	113,5	113,5	115,1	122,4	128,7	137,4	148,8	40,82
51,03	469,9	425,6	339,6	151,4	135,5	129,4	119,1	119,4	124,2	130,6	140,3	152,1	51,03
68,04	516,4	471,0	400,0	319,9	234,4	164,8	141,2	134,9	134,0	140,0	148,9	159,6	68,04
102,1	573,0	537,5	470,0	411,0	356,0	308,0	227,5	181,0	167,0	162,5	162,5	172,5	102,1
136,1	616,6	582,1	524,8	473,2	419,8	374,1	291,7	231,2	204,2	191,0	190,1	191,9	136,1
204,1	691,8	659,2	603,9	553,4	508,2	460,3	376,7	316,2	277,3	258,2	248,3	241,6	204,1
272,2	767,4	732,8	674,5	623,7	576,8	524,8	443,6	378,4	335,0	315,5	302,7	293,8	272,2
340,2	835,6	799,8	737,9	683,9	635,3	580,8	502,4	433,5	385,5	363,9	348,3	338,1	340,2

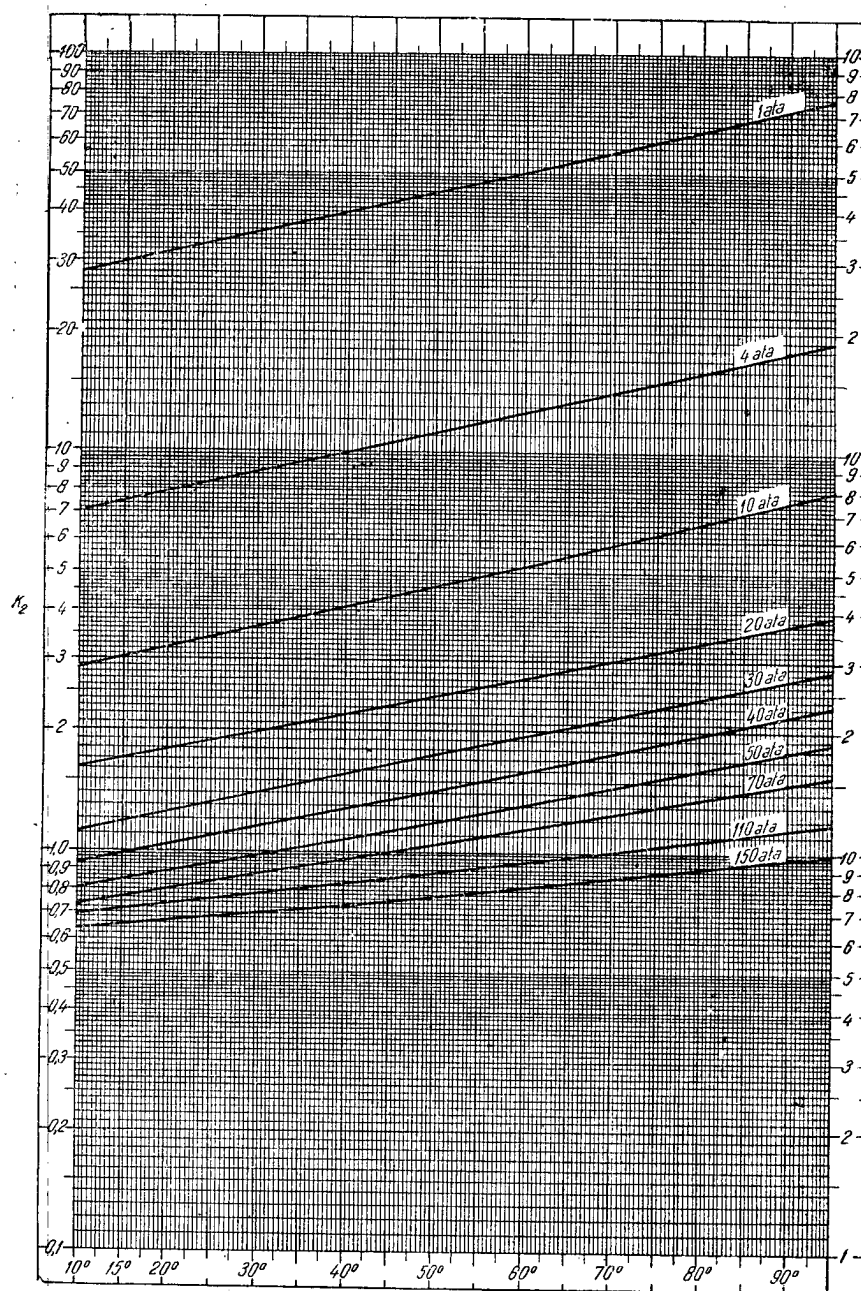


Fig. 112. Valorile coeficienților de echilibru ai etanului, în gama presiunilor și a temperaturilor de zăcămint, în echilibru cu un țigai de greutate moleculară medie.

Tabela 75. Fugacitatea etanului, în atmosfere, în funcție de presiune și temperatură

P, ata	Fugacitatea, în at, la temperatura în °C										P, ata
	21,1	25,6	32,2	37,8	43,3	54,4	71,1	87,8	104,44	121,1	
Vapori saturanți	27,20	29,77	32,35	—	—	—	—	—	—	—	Vapori saturanți
1,000	0,992	0,993	0,993	0,993	0,994	0,995	0,995	0,996	0,997	0,997	1,000
1,361	1,347	1,347	1,348	1,349	1,349	1,351	1,353	1,354	1,355	1,356	1,361
2,722	2,664	2,668	2,670	2,673	2,676	2,681	2,688	2,699	2,698	2,702	2,722
4,032	3,955	3,962	3,969	3,974	3,981	3,992	4,007	4,020	4,031	4,040	4,082
6,804	6,451	6,475	6,488	6,506	6,530	6,555	6,596	6,630	6,658	6,686	6,804
10,21	9,42	9,46	9,50	9,54	9,59	9,65	9,74	9,82	9,89	9,93	10,21
13,61	12,21	12,29	12,36	12,43	12,51	12,62	12,79	12,92	13,03	13,12	13,61
17,01	14,84	14,97	15,06	15,17	15,30	15,47	15,73	15,94	16,11	16,24	17,01
20,41	17,28	17,47	17,62	17,78	17,94	18,21	18,57	18,87	19,11	19,30	20,41
27,22	21,66	22,03	22,27	22,56	22,84	23,30	23,94	24,48	24,91	25,34	27,22
34,92	25,32	25,83	26,29	26,76	27,20	27,92	28,92	29,75	30,41	31,03	34,92
40,82	27,12	28,90	29,64	30,35	30,99	32,07	33,49	34,67	35,61	36,50	40,82
47,62	28,10	30,28	32,16	33,37	34,18	35,70	37,67	39,20	40,50	41,67	47,62
54,43	28,77	31,05	32,35	33,59	34,71	36,71	38,79	41,44	43,51	45,13	54,43
68,04	30,11	32,53	34,86	37,32	39,62	43,55	47,89	51,08	54,59	57,78	68,04
85,05	31,81	34,41	36,93	39,44	42,20	47,19	53,79	58,90	62,80	66,07	85,05
102,1	33,56	36,31	39,01	41,95	44,77	50,32	58,39	65,22	70,73	75,22	102,1
119,1	35,36	38,27	41,15	44,28	47,31	53,34	62,55	70,66	77,69	83,12	119,1
136,1	37,22	40,29	43,35	46,66	49,89	56,36	66,35	75,67	84,02	90,62	136,1
153,1	39,15	42,37	45,60	48,10	50,54	59,44	70,22	80,50	90,02	97,70	153,1
170,1	41,16	44,51	47,95	51,63	55,19	62,58	74,12	85,26	95,85	104,5	170,1
187,1	43,24	46,54	50,37	54,23	58,07	65,81	78,09	90,06	101,6	111,2	187,1
204,1	—	—	—	56,93	60,96	69,14	82,14	92,50	107,4	117,8	204,1
221,1	—	—	—	—	—	72,57	86,32	99,88	113,2	124,6	221,1
238,1	—	—	—	—	—	76,11	90,60	105,0	118,7	131,3	238,1

unde:

 C_p este căldura specifică, în kcal/Nm³.

— Căldura latentă de topire a etanului este de circa 19,2 kcal/kg, $\pm 0,05$ kcal/kg, la -172°C (respectiv ~ 597 kcal/k mol).

Tabela 76. Căldura specifică a etanului, în funcție de temperatură, la 1 ata în kcal/kmol $\cdot^\circ\text{K}$

$T, ^\circ\text{K}$	C_p	$T, ^\circ\text{K}$	C_p
250	11,93	800	26,38
300	13,16	900	28,31
350	14,56	1 000	29,82
400	16,15	1 100	31,21
450	17,70	1 200	32,43
500	19,20	1 300	33,50
600	21,92	1 400	34,42
700	24,30	1 500	35,22

— Căldura latentă de vaporizare a etanului este de $\sim 97,4$ kcal/kg -40°C și variază cu temperatura (v. tabela 77).

Tabela 77. Căldura latentă de vaporizare a etanului λ în kcal/kmol (1 kmol $\text{C}_2\text{H}_6 = 30,48$ kg).

$T, ^\circ\text{K}$	λ	$T, ^\circ\text{K}$	λ	$T, ^\circ\text{K}$	λ	$T, ^\circ\text{K}$	λ
184,46	3 325	215	3 106	245	2 760	275	2 151
185	—	220	3 060	250	2 684	280	2 014
190	3 292	225	3 077	255	2 600	285	1 840
200	3 258	230	2 954	260	2 507	290	1 633
205	3 187	235	2 89	265	2 39	295	1 381
210	3 149	240	2 83	270	2 29	300	1 026
						305,1	0

— Entalpia etanului, în funcție de temperatură și de presiune, în gama celor întâlnite în zăcămintele, este dată în tabelele 78 și 79.

— Entropia etanului, în funcție de temperatură și de presiune, în gama condițiilor de zăcămint, este dată în tabelele 80 și 81.

— Coeficienții Joule-Thomson, $\alpha = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H$,

de variație a temperaturii prin detenta adiabatică, se pot calcula cu relația (132). Pentru etan, valorile lor sînt date în tabela 82.

3) Propanul, C_3H_8 , greutate moleculară 44,063. În starea gazoasă, greutatea specifică este de 1,990 kg/m³N, densitatea față aer $-1,540$. În starea lichidă, densitatea relativă este de 0,5089 la $15,56^\circ\text{C}$, respectiv 0,590 la temperatura de fierbere (la presiunea atmosferică).

— Puncte caracteristice ale legii de stare:
Punctul critic:

$$T_c = 369,94^\circ\text{K} = 96,81^\circ\text{C};$$

$$P_c = 42,01 \text{ at} = 43,40 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\gamma_c = 226 \text{ kg/m}^3, v_c = 0,004425 \text{ m}^3/\text{kg} = 4,425 \text{ cm}^3/\text{g}.$$

Punct de topire la presiunea atmosferică:
 $T_t = 84,9^\circ\text{K} = -188,0^\circ\text{C}.$

Punct de fierbere la presiunea atmosferică:
 $T_t = 231,03^\circ\text{K} = -42,10^\circ\text{C}.$

Indice de refracție în starea lichidă: $n_D = 1,3397$ la $t^\circ = -42,1^\circ\text{C}.$

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE SISTEMELOR FLUIDE

293

Tabela 78. Entalpia etanolului în funcție de presiune și de temperatură, H kcal/kg ($H = 0$ la $15,56^\circ\text{C}$ și la presiunea corespunzătoare de vapori)

P , ata	$21,1^\circ\text{C}$	$25,6^\circ\text{C}$	$32,2^\circ\text{C}$	$37,8^\circ\text{C}$	$43,3^\circ\text{C}$	$54,4^\circ\text{C}$	$71,1^\circ\text{C}$	$87,8^\circ\text{C}$	$104,4^\circ\text{C}$	$121,1^\circ\text{C}$	P , ata
Vapori saturați: Vapori Lichid	52,08 5,60	47,24 12,68	34,34 25,7	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	Vapori saturați: Vapori Lichid
1,000	79,92	82,24	84,58	86,96	89,36	94,26	101,81	109,62	117,69	126,03	1,000
1,361	79,78	82,11	84,46	86,83	89,23	94,13	101,70	109,52	117,61	125,95	1,361
2,722	79,23	81,57	83,93	86,33	89,75	93,67	101,28	109,14	117,26	125,65	2,722
4,082	78,66	81,01	83,40	85,81	89,24	93,20	100,85	108,75	116,92	125,34	4,082
6,804	77,42	79,86	82,28	84,73	87,21	92,22	99,95	107,94	116,20	124,73	6,804
10,21	75,89	78,32	80,79	83,30	85,82	90,93	98,77	106,89	115,27	123,94	10,21
13,61	74,20	76,66	79,19	81,77	84,36	89,56	97,53	105,75	114,30	123,13	13,61
17,01	72,37	74,89	77,48	80,13	82,81	88,11	96,24	104,63	113,30	122,30	17,01
20,41	70,34	72,97	75,64	78,39	81,15	86,58	94,88	103,43	112,26	121,46	20,41
27,22	65,6	68,6	71,5	74,6	77,5	83,3	91,97	100,92	110,10	119,73	27,22
34,02	8,8	62,8	66,4	70,0	73,3	79,5	88,79	98,25	107,85	117,95	34,02
40,82	5,4	53,4	59,4	63,9	68,1	75,1	85,33	95,43	105,54	116,14	40,82
47,62	4,6	11,1	42,1	55,1	61,1	70,0	81,52	92,48	103,16	114,32	47,62
54,43	3,8	9,2	14,6	30,5	51,0	64,1	77,27	89,26	100,69	112,48	54,43
68,04	2,8	6,8	11,2	16,3	23,3	47,1	67,06	82,14	95,36	108,7	68,04
85,05	—	—	—	13,0	18,0	29,5	51,18	71,8	88,1	103,5	85,05
102,1	—	—	—	11,1	15,4	24,8	41,59	61,6	80,6	98,1	102,1
119,1	—	—	—	9,9	13,8	22,3	36,32	54,4	73,8	93,2	119,1
136,1	—	—	—	9,3	12,7	20,6	33,3	49,4	68,4	88,9	136,1
153,1	—	—	—	—	12,0	19,4	31,3	46,2	64,6	85,5	153,1
170,1	—	—	—	—	11,5	18,4	29,9	44,0	61,8	82,8	170,1
187,1	—	—	—	—	11,2	17,7	28,9	42,4	59,9	80,6	187,1
204,1	—	—	—	—	10,9	17,2	28,2	41,3	58,4	79,0	204,1
221,1	—	—	—	—	—	16,8	27,6	40,5	57,4	77,6	221,1
238,1	—	—	—	—	—	16,6	27,2	39,9	56,6	76,5	238,1

Tabela 79. Entalpia etanolului în faza lichidă și gazoasă, la presiunea de echilibru, în funcție de temperatură, H , kcal/kmol, față de lichid la începutul fierberii la presiunea atmosferică

T , $^\circ\text{K}$	t , $^\circ\text{C}$	H , kcal/kmol		T , $^\circ\text{K}$	t , $^\circ\text{C}$	H , kcal/kmol	
		lichid	vapori			lichid	vapori
184,46	— 88,73	0,0	3 325	245	— 28,19	1 133	3 893
185	— 88,19	—	—	250	— 23,19	1 239	3 923
190	— 83,19	97,7	3 390	255	— 18,19	1 344	3 944
195	— 78,19	186,3	3 444	260	— 13,19	1 455	3 962
200	— 73,19	275,7	3 502	265	— 8,19	1 568	3 966
205	— 68,19	365,9	3 553	270	— 3,19	1 685	3 975
210	— 63,19	457,1	3 605	275	+ 1,81	1 806	3 957
215	— 58,19	549,3	3 655	280	+ 6,81	1 933	3 947
220	— 53,19	642,6	3 703	285	+ 11,81	2 067	3 907
225	— 48,19	737,3	3 744	290	+ 16,81	2 211	3 849
230	— 43,19	833,4	3 788	295	+ 21,81	2 370	3 751
235	— 38,19	931,3	3 825	300	+ 26,81	2 540	3 566
240	— 33,19	1 031,0	3 861	305,2	+ 32,01	3 050	3 050

Tabela 80. Entropia etanolului în starea lichidă și gazoasă, la presiunea de echilibru, S în kcal/kmol $^\circ\text{K}$, față de $T = 184,46^\circ\text{K}$ și la presiunea de echilibru corespunzătoare

T , $^\circ\text{K}$	t , $^\circ\text{C}$	S , în kcal/kmol $^\circ\text{K}$		T , $^\circ\text{K}$	t , $^\circ\text{C}$	S , în kcal/kmol $^\circ\text{K}$	
		lichid	vapori			lichid	vapori
184,46	— 88,73	0,0000	18,03	245	— 28,19	5,230	16,51
185	— 88,19	0,0510	18,01	250	— 23,19	5,644	16,39
190	— 83,19	0,5181	17,85	255	— 18,19	6,052	16,24
195	— 78,19	0,9747	17,69	260	— 13,19	6,462	16,10
200	— 73,19	1,424	17,55	265	— 8,19	6,876	15,95
205	— 68,19	1,862	17,43	270	— 3,19	7,293	15,77
210	— 63,19	2,297	17,29	275	+ 1,81	7,207	15,57
215	— 58,19	2,726	17,17	280	+ 6,81	8,156	15,35
220	— 53,19	3,149	17,07	285	+ 11,81	8,607	15,08
225	— 48,19	3,570	16,94	290	+ 16,81	9,082	14,73
230	— 43,19	3,988	16,84	295	+ 21,81	9,601	14,29
235	— 38,19	4,403	16,73	300	+ 26,81	10,200	13,61
240	— 33,19	4,817	16,61	305,2	+ 32,01	11,95	11,95

Tabela 81. Entropia etanului gazos în condițiile de temperatură și de presiune din zăcămintele, S kcal/kg°C

P, ata	21,1°C	25,6°C	32,2°C	37,8°C	43,3°C	54,4°C	71,1°C	87,8°C	104,4°C	121,1°C	P, ata
Vapori saturați	0,1762	0,1561	0,1107	—	—	—	—	—	—	—	Vapori saturați
Lichid	0,0189	0,0409	0,822	—	—	—	—	—	—	—	Lichid
1,000	0,4901	0,4978	0,5057	0,5134	0,5210	0,5362	0,5587	0,5809	0,7027	0,6243	1,000
1,361	0,4695	0,4773	0,4857	0,4925	0,5004	0,5156	0,5382	0,5604	0,5822	0,6039	1,361
2,722	0,4225	0,4304	0,4382	0,4460	0,4537	0,4689	0,4915	0,5138	0,5358	0,5575	2,722
4,082	0,3945	0,4024	0,4103	0,4182	0,4259	0,4421	0,4639	0,4836	0,5084	0,5302	4,082
6,804	0,3582	0,3661	0,3741	0,3821	0,3900	0,4055	0,4284	0,4510	0,4733	0,4954	6,804
10,21	0,3278	0,3359	0,3441	0,3526	0,3602	0,3760	0,3992	0,4221	0,4447	0,4672	10,21
13,61	0,3048	0,3132	0,3215	0,3298	0,3379	0,3541	0,3777	0,4009	0,4238	0,4468	13,61
17,01	0,2858	0,2943	0,3028	0,3113	0,3196	0,3362	0,3603	0,3839	0,4071	0,4306	17,01
20,41	0,2686	0,2776	0,2864	0,2951	0,3037	0,3208	0,3453	0,3694	0,3930	0,4170	20,41
27,22	0,2373	0,2475	0,2572	0,2668	0,2761	0,2941	0,3200	0,3453	0,3698	0,3949	27,22
34,02	0,2046	0,2174	0,2291	0,2410	0,2513	0,2704	0,2983	0,3251	0,3506	0,3771	34,02
40,82	0,0172	0,1794	0,1979	0,2130	0,2263	0,2479	0,2785	0,3072	0,3342	0,3619	40,82
47,62	0,0125	0,0341	0,1362	0,1794	0,1992	0,2253	0,2597	0,2906	0,3192	0,3455	47,62
54,43	0,0086	0,0251	0,0476	0,0958	0,1599	0,2011	0,2410	0,2749	0,3056	0,3364	54,43
68,04	0,0020	0,0141	0,0287	0,0447	0,0669	0,1118	0,2016	0,2444	0,2802	0,3149	68,04
85,05	—	—	—	—	0,0291	0,0450	0,0831	0,1477	0,2065	0,2505	85,05
102,1	—	—	—	—	0,0195	0,0329	0,0646	0,1150	0,1723	0,2231	102,1
119,1	—	—	—	—	0,0124	0,0242	0,0513	0,0953	0,1469	0,1990	119,1
136,1	—	—	—	—	0,0067	0,0174	0,0421	0,0834	0,1290	0,1795	136,1
153,1	—	—	—	—	—	0,0117	0,0347	0,0728	0,1159	0,1647	153,1
170,1	—	—	—	—	—	0,0068	0,0285	—	0,1060	0,1530	170,1
187,1	—	—	—	—	—	0,0024	0,0232	0,0589	0,0982	0,1443	187,1
204,1	—	—	—	—	—	0,0012	0,0184	0,0534	0,0918	0,1368	204,1
221,1	—	—	—	—	—	—	0,0142	0,0495	0,0861	0,1304	221,1
238,1	—	—	—	—	—	—	0,0103	0,0441	0,0811	0,1248	238,1

Tabela 82. Coeficienții de răcire adiabatică, ai etanului în °K/at,

P, ata	21,1°C	37,8°C	54,4°C	71,1°C	87,8°C	104,4°C
1,000	0,96	0,84	0,745	0,663	0,581	0,501
0,804	1,05	0,91	0,803	0,696	0,613	0,523
13,61	1,16	1,00	0,86	0,737	0,639	0,550
20,41	1,29	1,08	0,91	0,778	0,670	0,581
27,22	1,42	1,16	0,96	0,817	0,694	0,60
34,02	1,55	1,24	1,01	0,85	0,711	0,60
40,82	—	1,32	1,06	0,087	0,714	0,60

— Presiunea de vapori în echilibru cu lichidul este, după diferiți cercetători, exprimată prin:

$$\log P_{(\text{mm})} = - \frac{1325,358}{T} + 10,64920 - \quad (146)$$

$$- 0,011895 T + 10^{-6} \cdot 13,42 T^2$$

(propusă între - 107°C și - 42°C);

sau:

$$\log P_{(\text{mm})} = 6,83054 - \frac{813,864}{248,116 + t} \quad (147)$$

(propusă între - 187,65°C și - 42,06°C), v. tabela 83; sau:

$$\log P_{(\text{at})} = 4,4132 - \frac{1048,9}{278,76 + t} \quad (148)$$

(între - 42,06°C și + 28,77°C), v. tabela 84; sau:

$$\log P_{(\text{at})} = 5,0733 - \frac{1578,2}{360,65 + t} \quad (149)$$

(între + 28,77°C și + 96,8°C), v. tabela 85.

Valorile din gama condițiilor de temperatură din zăcămint sunt date în fig. 113.

Tabela 83. Presiunile de vapori ale propanului lichid, observate și calculate după relațiile (146) și (147), în gama - 106,9°C... - 41,6°C

t, °C	P _{observată} , ata	P calculată, în mm col. Hg		Abateră dntre valoarea observată și cea calculată cu relația (146)		Abateră dntre valoarea observată și cea calculată cu relația (147)	
		după (146)	după (147)	mm col. Hg	%	mm col. Hg	%
-106,960	11,61	11,64	11,61	-0,03	-0,26	0,00	0,00
-99,830	22,00	21,98	21,98	+0,02	+0,09	+0,02	+0,09
-93,308	37,39	37,39	37,44	0,00	0,00	-0,05	-0,13
-85,803	65,44	65,44	65,52	0,00	0,00	-0,08	-0,12
-78,019	111,03	111,05	111,13	-0,02	-0,02	-0,10	-0,09
-70,240	179,92	179,92	179,92	0,00	0,00	0,00	0,00
-63,244	268,33	268,46	268,35	-0,13	-0,05	-0,02	-0,01
-58,168	351,66	351,66	351,45	0,00	0,00	+0,21	+0,06
-52,891	459,13	459,14	458,86	-0,01	0,00	+0,27	+0,06
-48,052	578,89	579,04	578,79	-0,15	-0,03	+0,10	+0,02
-44,344	686,19	686,51	686,34	-0,32	-0,05	-0,15	-0,02
-41,688	772,71	772,57	772,56	+0,02	+0,02	+0,15	+0,02

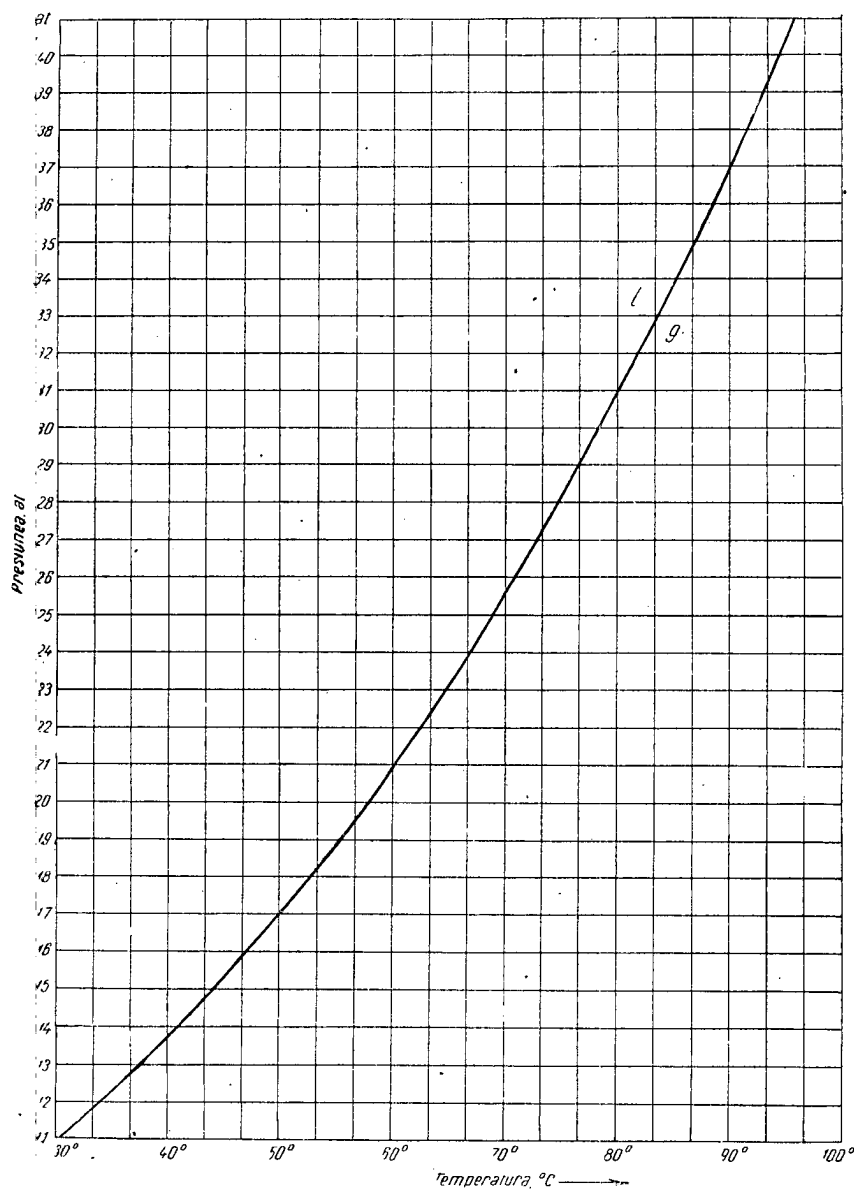


Fig. 113. Presiunea de vaporii a propanului, în gama presiunilor și a temperaturilor de zăcămint.

-- Legea de stare a propanului $F(P, v, T) = 0$, determinată conform ecuației (121) are următoarele valori pentru coeficienții:

$$\begin{aligned} B_0 &= 0,0973130; & A_0 &= 6,87225; \\ C_0 &= 10^6 \cdot 0,508256; & b &= 0,0225000; \\ a &= 0,947700; & C &= 10^6 \cdot 0,1290; \\ \gamma &= 0,02200; & \alpha &= 10^{-3} \cdot 0,607175, \end{aligned}$$

propușe pentru intervalul $+97^\circ < t < +275^\circ$, cu abatere medie de 0,4% asupra lui P , respectiv

Tabela 84. Presiunile de vapori ale propanului lichid, observate și calculate după relația (148)

$t, ^\circ\text{C}$	Presiune, ata		Abaterea, ata	
	observată	calculată	observată	calculată
-40,00	1,102	1,092	+0,010	+0,91
-34,44	1,38	1,375	+0,005	+0,36
-28,89	1,73	1,712	+0,018	+1,04
-23,33	2,14	2,104	+0,036	+1,68
-17,78	2,59	2,584	+0,006	+0,23
-12,22	3,13	3,133	-0,003	-0,10
-6,67	3,77	3,77	0,00	0,00
-1,11	4,51	4,504	+0,006	+0,13
+4,44	5,30	5,340	-0,040	-0,75
15,56	7,29	7,37	-0,08	-1,10
21,11	8,43	8,578	-0,148	-1,76
26,67	9,71	9,934	-0,224	-2,31
32,22	11,16	11,39	-0,23	-2,06
37,78	12,72	12,96	-0,24	-1,89
43,33	14,43	14,68	-0,25	-1,73
48,89	16,33	16,60	-0,27	-1,65
Abatere medie			1,11%	
Abatere maximă			-2,31%	

Tabela 85. Presiunile de vapori ale propanului lichid, observate și calculate după relația (149)

$t, ^\circ\text{C}$	Presiunea, ata		Abaterea	
	observată	calculată	at	%
28,77	10,485	10,485	0,000	0,00
28,80	10,398	—	—	—
29,80	10,666	—	—	—
30,00	10,780	10,798	-0,018	-0,17
31,46	11,101	—	—	—
33,53	11,764	—	—	—
35,20	12,156	—	—	—
38,34	13,075	13,118	-0,043	-0,33
42,33	14,310	—	—	—
45,00	15,269	—	—	—
45,13	15,272	15,274	-0,002	0,01
51,79	18,552	—	—	—
57,45	19,840	19,887	-0,047	-0,24
60,81	21,314	21,314	0,000	0,00
63,50	22,452	—	—	—
66,97	24,229	24,133	+0,096	+0,36
71,49	26,428	—	—	—
75,06	28,515	—	—	—
75,09	28,334	—	—	—
78,49	30,282	30,160	+0,122	+0,40
84,86	33,841	—	—	—
87,97	35,31	35,922	-0,091	-0,25
90,05	37,194	—	—	—
90,30	37,333	—	—	—
92,32	38,537	—	—	—
93,00	36,769	—	—	—
96,60	40,123	—	—	—
95,70	41,266	—	—	—
95,82	41,041	41,210	-0,169	-0,41
Abaterea medie			0,22%	
Abaterea maximă			+0,40%	

după alte cercetări:

$$\begin{aligned} B_0 &= (0,459964)^3; & A_0 &= 2,26150)^2; \\ C_0 &= (712,921); & b &= (0,282310)^3; \\ a &= (0,982254)^3; & C &= (50,5277)^3; \\ \gamma &= (0,148324)^3; & \alpha &= (0,0846781)^3. \end{aligned}$$

Sub forma ecuației (122), coeficienții ei sînt:

$$\begin{aligned} A_0 &= 11,9200; & B_0 &= 0,18100; \\ a &= 0,07321; & b &= 0,04293; \\ C &= 1,20 \cdot 10^6. \end{aligned}$$

Sub forma ecuației (123), coeficienții ei sînt:

$$\begin{aligned} A_0 &= 8,624; & B_0 &= 0,1079; & a &= 0,04372; \\ b &= -0,06053; & c &= 3,65 \cdot 10^6. \end{aligned}$$

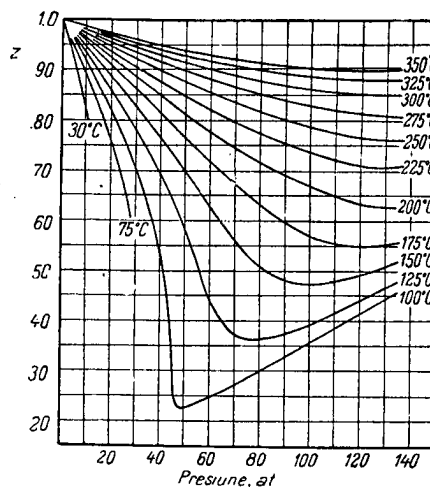


Fig. 114. Relația (P, v, T) a propanului sub forma $\frac{P \cdot v}{RT} = Z$.

Sub forma (16), coeficienții au valorile:

$$a = 0,015364; \quad b = 0,00412.$$

Pentru problemele curente, este preferabil să se determine $F(P, v, T) = 0$, fie pe baza diagramelor experimentale (v. fig. 114), fie pe baza legii $P \cdot v = R \cdot T \cdot Z$, unde Z poate fi luat din tabela 86.

În domeniul de echilibru lichid-vapori, volumul specific al ambelor faze este definit prin valoarea greutății specifice (v. fig. 115).

— Viscositatea propanului în starea gazoasă, la presiuni joase, practic independentă de presiune, este dată în tabela 87 și corespunde aproximativ legii

$$\mu = 99,8 \cdot 10^{-7} \frac{T}{T + 318} \quad (150)$$

Tabela 86. Coeficienții de abatere ai propanului dela legea gazelor perfecte

P, ata	Valoarea lui Z, la temperatura, în °C										P, ata
	30	75	100	107,8	125	150	200	2,532 2	297,3	336,16	
1	0,9842	0,9892	0,9916	0,9926	—	0,9943	0,9960	0,9975	—	—	1
2	0,9685	0,9792	—	—	—	—	—	—	—	—	2
3	0,9526	—	—	0,9782	—	—	—	—	—	—	3
4	0,9360	0,9585	—	—	—	—	—	—	—	—	4
5	0,9190	—	0,9571	0,9633	0,9656	0,9711	0,9801	0,9873	—	—	5
6	0,9008	0,9374	—	—	—	—	—	—	—	—	6
7	0,8813	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7
8	0,8605	0,9160	—	—	—	—	—	—	—	—	8
9	0,8375	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9
10	0,8108	0,8936	0,9137	0,9256	0,9310	0,9428	0,9605	0,974 4	—	—	10
10,6	0,7930	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,6
12	—	0,8695	—	—	—	—	—	—	—	—	12
14	—	0,8447	—	—	—	—	—	—	—	—	14
15	—	—	0,8665	0,8843	0,9025	0,9151	0,9410	0,9619	0,9714	—	15
16	—	0,8185	—	—	—	—	—	—	—	—	16
18	—	0,7907	—	—	—	—	—	—	—	—	18
20	—	0,7607	0,8160	0,8386	0,8585	0,8867	0,921 8	0,9488	0,9618	—	20
22	—	0,7275	—	—	—	—	—	—	—	—	22
24	—	0,6910	—	—	—	—	—	—	—	—	24
25	—	—	0,7618	0,7903	0,8195	0,8572	0,9032	0,9363	0,9325	—	25
26	—	0,6469	—	—	—	—	—	—	—	—	26
28	—	0,6025	—	—	—	—	—	—	—	—	28
30	—	—	0,7001	0,7380	0,7785	0,8270	0,8850	0,9242	0,9435	—	30
35	—	—	0,6287	0,6782	0,7336	0,7965	0,8664	0,9125	0,9345	—	35
40	—	—	0,5330	0,6058	0,6852	0,7642	0,8480	0,9010	0,9260	0,9398	40
45	—	—	0,2800	0,5225	0,6365	0,7292	0,8290	0,8899	0,9182	—	45
47	—	—	0,2292	—	—	—	—	—	—	—	47
48	—	—	0,2264	—	—	—	—	—	—	—	48
49	—	—	0,2251	—	—	—	—	—	—	—	49
50	—	—	0,2250	0,3900	0,5760	0,6933	0,8102	0,8790	0,9110	0,9290	50
55	—	—	0,2326	0,2877	0,5090	0,6580	0,7923	0,8692	0,9042	—	55
57	—	—	—	0,2800	—	—	—	—	—	—	57
59	—	—	—	0,2769	—	—	—	—	—	—	59
60	—	—	0,2432	0,2762	0,4415	0,6243	0,7753	0,8595	0,8982	0,9197	60
65	—	—	0,2562	0,2821	0,3920	0,5907	0,7587	0,8500	0,8922	—	65
70	—	—	0,2702	0,2914	0,3688	0,5572	0,7422	0,8408	0,8868	0,9122	70
75	—	—	0,2842	0,3033	0,3610	0,5266	0,7267	0,8320	0,8815	—	75
80	—	—	0,2994	0,3159	0,3614	0,5024	0,7120	0,8235	0,8770	0,9062	80
85	—	—	0,3133	0,3284	0,3650	0,4862	0,6979	0,8152	0,8720	—	85
90	—	—	0,3276	0,3419	0,3720	0,4780	0,6853	0,8070	0,8675	0,9005	90
95	—	—	0,3420	0,3577	0,3803	0,4737	0,6742	0,7998	0,8640	—	95
100	—	—	0,3563	0,3696	0,3913	0,4726	0,6642	0,7932	0,8603	0,8962	100
105	—	—	0,3710	0,3838	0,4023	0,4740	0,6555	0,7875	0,8570	—	105
110	—	—	0,3857	0,3980	0,4140	0,4778	0,6478	0,7827	0,8540	0,8932	110
115	—	—	0,4005	0,4119	0,4264	0,4830	0,6412	0,7783	0,8510	—	115
120	—	—	0,4154	0,4258	0,4390	0,4895	0,6354	0,7750	0,8490	0,8912	120
125	—	—	0,4302	0,4397	0,4520	0,4980	0,6311	0,7715	0,8467	—	125
130	—	—	0,4448	0,4532	0,4652	0,5072	0,6280	0,7690	0,8450	0,8900	130
135	—	—	—	—	—	0,5174	0,6262	0,7663	0,8435	—	135
140	—	—	—	—	0,4920	0,5283	—	—	—	0,8900	140

în care:

μ este viscozitatea absolută a propanului gazos, în centipoise;
 T — temperatura absolută, în °K.

O b s e r v a Ț i e. Se recomandă valorile din prima serie, a căror concordanță în reprezentare grafică este mai bună.

Tabela 87. Viscozitatea absolută a propanului la presiuni joase, în funcție de temperatură, după datele a doi cercetători diferiți

t, °C	μ cP		t, °C	μ cP	
	I	II		I	II
0	762	respectiv 751	60	932	respectiv 922
20	820	» 806	70	961	» —
30	845	» —	80	988	» 978
40	873	» 873	90	1 013	» —
50	908	» —	100	1 140	» 1 029

Pentru domeniile presiunilor și ale temperaturilor de zăcămint, se dispune de datele a două serii de cercetări (v. tabelele 88 și 89).

— Fugacitate-activitate. Coeficienții de fugacitate ai propanului sînt dați, pentru diferite presiuni și pentru diferite temperaturi, în tabela 90.

Coeficienții de activitate ai propanului sînt dați, pentru diferite presiuni și pentru diferite temperaturi, în tabela 91.

— Coeficienții de echilibru ai propanului, funcții de temperatură și de presiune, se deosebesc și de la sistem la sistem, din cauza compoziției sistemului. Valorile date în fig. 116 într-o gamă mai extinsă, sînt mai puțin apropiate de coeficienții de echilibru ai propanului cu un țitei mediu (cu greutatea moleculară 240) din fig. 117 (v. și tab. 131 și urm.).

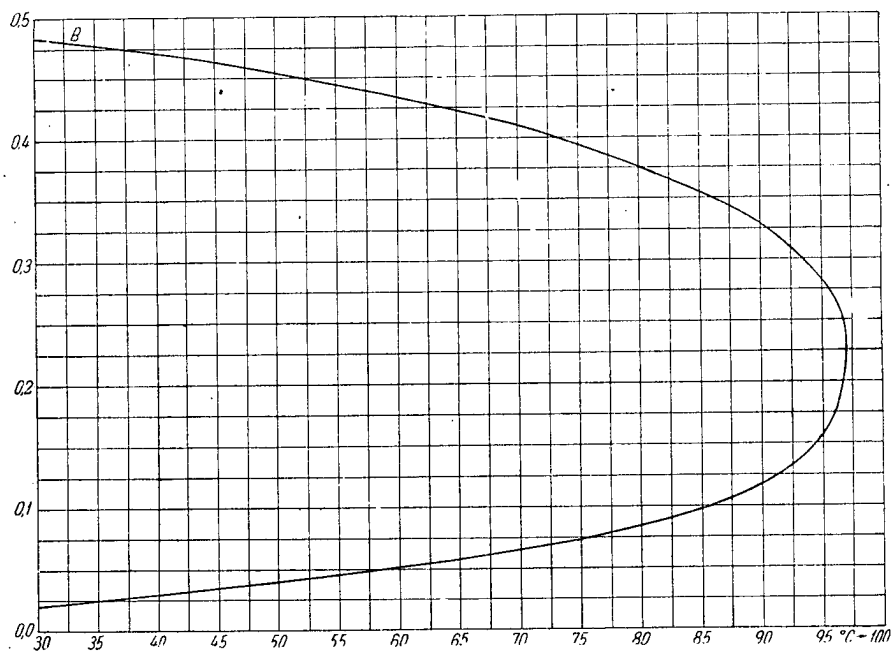


Fig. 115. Greutatea specifică a fazei lichide și a fazei gazoase, ale propanului, în funcție de temperatură, în echilibru.

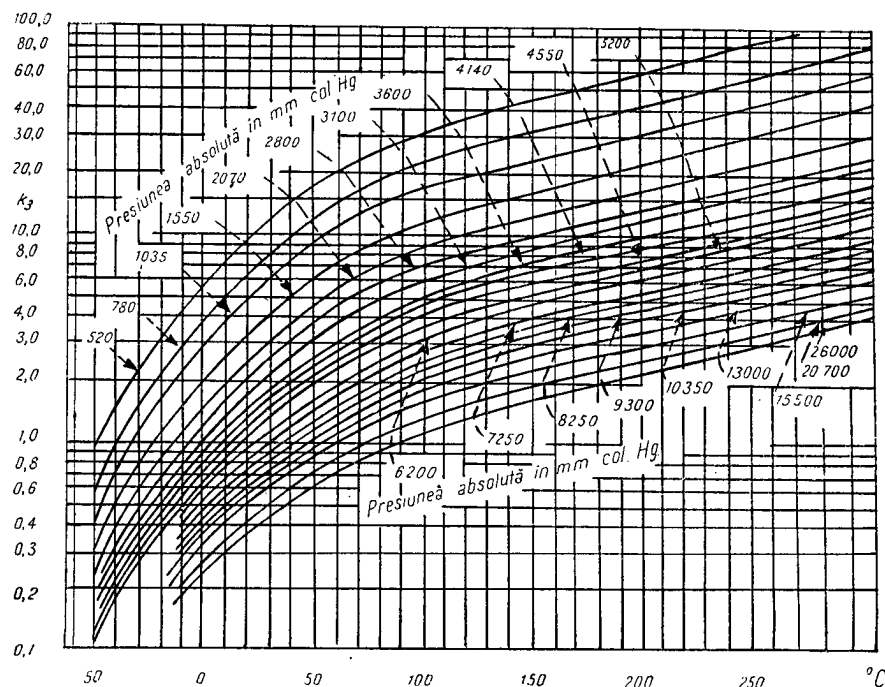


Fig. 116. Valorile aproximative ale coeficienților de echilibru ai propanului, în funcție de temperatură și de presiune. Date făcând abstracție de compoziția restului sistemelor, dar acoperind un domeniu (P, T) mai larg.

Tabela 88. Viscositatea propanului, $10^6 \mu$, cP, la presiuni înalte

P, ata	10 ⁶ , centipoise, la temperatura					$\pi = P/P_{critic}$
	37,78°C	54,44°C	71,11°C	87,78°C	104,44°C	
La saturație	—	—	—	—	—	—
Vapori	871	142	164	206	—	—
Lichid	—	712	573	440	—	—
1,00	80,7	87,7	93,2	98,2	100	0,023 8
3,40	81,4	89,1	94,2	99,6	103	0,080 9
6,80	87,7	92,7	97,4	102	106	0,162
10,21	105	102	103	106	110	0,243
13,61	872	115	110	111	115	0,324
17,91	—	130	119	117	120	0,405
20,41	885	—	131	123	126	0,486
23,81	—	—	147	131	133	0,567
27,22	897	732	576	140	142	0,649
30,62	—	—	—	152	150	0,730
34,02	—	—	599	177	159	0,810
37,42	—	—	—	449	168	0,894
40,82	922	762	619	468	172	0,973
44,22	—	—	—	—	182	—
47,62	—	—	—	501	280	—
51,03	—	—	—	—	569	—
54,43	947	782	649	525	389	—
68,04	969	808	674	566	443	—
85,05	995	837	704	604	488	—
102,1	1 018	863	732	637	525	—
119,1	1 040	888	780	668	556	—
136,1	1 063	912	785	696	585	—

— Căldura specifică a propanului, la presiune constantă, (1 ata) este exprimată aproximativ între 298,16°K și 1 000°K, cu relațiile: (151)–(156) (v. și tabela 92).

$$C_p = 2,410 + 57,195 \cdot 10^{-3} T - 175,33 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (151)$$

$$C_p = -1,147 + 73,449 \cdot 10^{-3} T - 382,79 \cdot 10^{-7} T^2 + 7,827 \cdot 10^{-9} T \quad (152)$$

unde:

C_p este căldura specifică molară, în kcal/kmol°K;

T — temperatura absolută, în °K;

sau:

$$C_p = 0,05246 + 1,2980 \cdot 10^{-3} T - 3,988 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (153)$$

$$C_p = 0,02604 + 1,668 \cdot 10^{-3} T - 7,555 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,1778 \cdot 10^{-9} T^3 \quad (154)$$

unde C_p este căldura specifică, în kcal/kg · °K sau:

$$C_p = 0,1044 + 2,584 \cdot 10^{-3} T - 7,93 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (155)$$

$$C_p = -0,0518 + 3,32 \cdot 10^{-3} T - 15,03 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,354 \cdot 10^{-9} T^3 \quad (156)$$

cu C_p , în kcal/Nm³ · °K.

Pentru presiuni superioare celei atmosferice, se recomandă folosirea căldurii specifice medii $\Delta H/\Delta T$ (v. entalpia).

— Căldura latentă de vaporizare a propanului este dată în tabela 93 pentru domeniul de temperaturi și de presiuni de zăcămint în care coexistă faza lichidă și cea gazoasă.

— Entalpia propanului gazos și a celui lichid la diferite temperaturi și la diferite presiuni, este dată în tabela 94. Entalpia propanului lichid și a celui gazos (în stare de vapori saturați) este dată în tabela 95.

— Entropia propanului în starea lichidă și în cea gazoasă, la diferite presiuni și la diferite temperaturi din gama acelor de zăcămint, este dată în tabela 96.

Entropia fazei lichide și a celei gazoase în echilibru ale propanului este dată în tabela 97.

— Coeficienții Joule-Thomson $\alpha = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$,

de variație a temperaturii prin detentă adiabatică, se pot calcula cu relația (132). Pentru propan, valorile lor sînt date în tabela 98.

4) Butanul C_4H_{10} . Butanul natural cuprinde proporții variabile de butan normal

Tabela 89. Viscositatea propanului în faza lichidă și în aer gazoasă, la presiuni ridicate

P, ata	la temperatura, în °C							
	21,85	40,3	58,7	77,2	95	115	150	190
6,80	—	90,8	93,1	96,3	100,2	104,7	113,6	123,2
13,61	831,8	104,0	99,3	100,2	102,6	105,7	113,8	124,2
20,41	993,1	859,0	719,5	108,1	107,2	108,3	113,5	125,6
27,22	1 002	876,0	751,6	119,4	114,3	111,8	117,2	127,6
34,02	1 009	891,2	770,9	535,8	128,5	118,9	121,8	130,5
40,82	1 022	903,7	787,1	568,9	328,1	131,8	129,1	133,8
51,03	1 038	922,6	807,2	609,5	414,1	174,6	143,9	140,8
68,04	1 067	952,8	839,5	668,8	505,2	297,2	177,8	159,2
102,1	1 135	1 014	895,4	753,3	608,4	430,5	285,1	213,3
136,1	1 202	1 069	948,4	818,5	679,5	516,4	364,8	269,8
170,1	1 265	1 119	988,5	869,0	736,2	591,6	426,6	319,9
204,1	1 318	1 162	1 026	912,0	779,8	645,7	478,6	364,3
272,2	1 419	1 236	1 092	986,3	858,0	721,1	579,4	454,5
340,2	1 493	1 291	1 140	1 040	918,3	770,9	671,4	529,7

Tabela 90. Fuga citatea propanului, în ata, în funcție de temperatură și de presiune

P, ata	Fuga citatei, în ata, la temperatura, în °C															P, ata
	30	50	70	90	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	
1,00	—	—	—	—	0,994	0,996	0,996	0,996	0,997	0,997	—	—	—	—	—	1,00
2,50	2,41	2,42	2,43	2,45	2,45	2,47	2,47	2,47	2,48	2,48	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,50
5,00	4,62	4,68	4,74	4,79	4,81	4,86	4,88	4,88	4,90	4,92	4,93	4,95	4,96	4,96	4,97	5,00
10,0	8,48	8,73	8,96	9,16	9,27	9,60	9,46	9,53	9,61	9,68	9,74	9,78	9,82	9,84	9,87	10,0
15,0	9,04	12,13	13,67	13,11	13,13	13,73	13,79	13,96	14,13	14,28	14,41	14,51	14,60	14,64	14,71	15,0
20,0	9,24	13,55	15,83	16,62	16,84	17,63	17,87	18,18	18,48	18,73	18,97	19,15	19,29	19,34	19,49	20,0
25,0	9,41	13,79	18,41	19,65	20,11	21,25	21,71	22,21	22,65	23,04	23,33	23,66	23,89	23,97	24,19	25,0
30,0	9,60	14,07	19,03	22,18	22,90	24,53	25,31	26,03	26,67	27,22	27,71	28,08	28,40	28,53	28,84	30,0
35,0	9,77	14,33	19,40	24,19	25,39	27,51	28,69	29,67	30,52	31,26	31,92	32,41	32,83	32,01	33,42	35,0
40,0	9,95	14,59	19,78	25,22	27,54	30,35	31,84	33,12	34,19	35,17	36,01	36,64	37,18	37,43	37,94	40,0
45,0	10,13	14,85	20,17	25,95	29,11	32,80	34,77	36,40	37,78	38,96	40,01	40,78	41,46	41,78	42,40	45,0
50,0	10,31	15,11	20,56	26,51	29,92	34,96	37,48	39,50	41,19	42,63	43,90	44,84	45,66	46,08	46,81	50,0
55,0	10,49	15,38	20,95	27,05	30,50	36,88	39,97	42,44	44,45	46,18	47,70	48,82	49,80	50,31	51,16	55,0
60,0	10,67	15,67	21,34	27,60	31,13	38,38	42,27	45,21	47,59	49,63	51,41	52,72	54,14	54,50	55,47	60,0
65,0	10,86	15,93	21,73	28,14	31,76	39,52	44,37	47,83	50,60	52,97	55,03	56,56	57,88	58,63	59,71	65,0
70,0	11,06	16,21	22,12	28,68	32,38	40,75	46,30	50,30	53,50	56,21	58,57	60,32	61,83	62,71	63,93	70,0
75,0	11,24	16,44	22,51	29,22	33,00	41,83	48,06	52,64	56,28	59,36	62,02	64,01	65,73	66,75	68,11	75,0
80,0	11,43	16,77	22,91	29,77	33,67	42,85	49,69	54,85	58,95	62,42	65,40	67,64	69,57	70,75	72,25	80,0
85,0	11,63	17,05	23,32	30,32	34,29	43,80	51,19	56,95	61,53	65,39	68,71	71,22	73,37	74,70	76,36	85,0
90,0	11,83	17,35	23,74	30,88	34,94	44,85	52,61	58,94	64,01	68,28	71,94	74,73	77,12	78,62	80,44	90,0
95,0	12,03	17,60	24,16	31,46	35,60	45,90	53,99	60,84	66,40	71,09	75,11	78,19	80,82	82,50	84,50	95,0
100,0	12,24	17,95	24,59	32,03	36,25	46,75	55,31	62,66	68,72	73,84	78,22	81,60	84,48	86,34	88,52	100,0
105,0	12,45	18,26	25,02	32,61	36,90	47,64	56,60	64,41	70,97	75,52	81,27	84,96	88,11	90,16	92,53	105,0
110,0	12,67	18,58	25,46	33,19	37,58	48,58	57,87	66,10	73,16	79,13	84,27	88,27	91,70	93,94	96,51	110,0
115,0	12,89	18,89	25,90	33,79	38,24	49,50	59,12	67,74	75,28	81,69	87,21	91,55	95,26	97,70	100,5	115,0
120,0	13,11	19,22	26,34	34,39	38,88	50,38	60,36	69,34	77,36	84,21	90,12	94,77	98,78	101,4	104,4	120,0
125,0	13,34	19,55	26,80	34,99	39,53	51,30	61,59	70,91	79,38	86,98	92,98	97,97	102,3	105,2	108,4	125,0
130,0	13,56	19,86	27,24	35,60	40,24	52,26	62,81	72,46	81,37	—	95,81	101,1	105,7	108,8	112,3	130,0
135,0	13,79	20,21	27,70	36,22	—	53,20	64,04	—	83,31	—	98,60	104,3	109,1	112,6	116,2	135,0
140,0	14,02	20,55	28,16	36,85	—	54,10	65,27	—	—	—	101,4	107,4	112,6	116,2	120,1	140,0

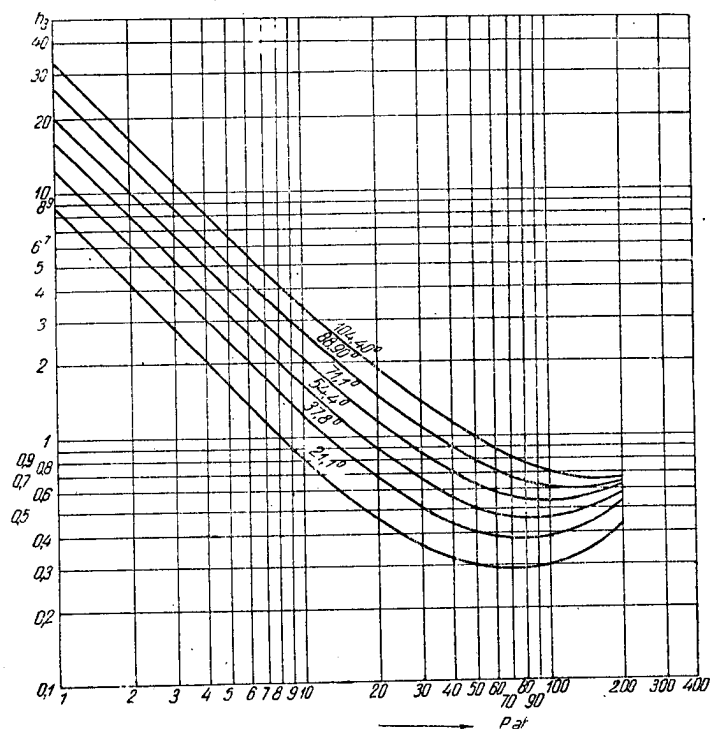


Fig. 117. Valorile coeficienților de echilibru ai propanului, în funcție de temperatură și de presiune, în gama condițiilor de zăcămint pentru un țipei cu greutate moleculară medie.

Tabela 91. Coeficienții de activitate γ ai propanului, în funcție de temperatură și de presiune, în gama de temperaturi și de presiuni întâlnite în zăcămint

P, ata	la temperaturi, în °C					
	21,1	37,8	54,4	74,1	87,8	104,4
1,701	0,9731	0,9761	0,9800	0,9823	0,9859	0,9884
3,402	0,9435	0,9516	0,9679	0,9639	0,9703	0,9761
5,103	0,9149	0,9274	0,9354	0,9449	0,9533	0,9620
6,804	0,8855	0,9001	0,9158	0,9266	0,9372	0,9473
8,505	0,8559	0,8743	0,8933	0,9081	0,9212	0,9332
10,206	—	0,8491	0,8728	0,8897	0,9036	0,9174
11,907	—	0,8271	0,8519	0,8703	0,8884	0,9055
13,61	0,5509	0,7688	0,8338	0,8535	0,8722	0,8904
15,31	—	—	0,8129	0,8351	0,8567	0,8769
17,01	0,4518	0,6315	0,7904	0,8160	0,8400	0,8632
18,71	—	—	—	0,7992	0,8244	0,8492
20,41	0,3741	0,5269	0,7048	0,7816	0,8091	0,8363
23,81	—	—	—	0,7461	0,7759	0,7939
27,22	0,2879	0,4060	0,5420	0,6907	0,7457	0,7821
30,62	—	—	—	—	0,7144	0,7575
34,02	0,2349	0,3308	0,4457	0,5672	0,6831	0,7312
40,82	0,2017	0,2822	0,3799	0,4853	0,5861	—
47,63	0,1771	0,2421	0,3345	0,4273	0,5177	—
54,43	0,1589	0,2222	0,3002	0,3821	0,4656	—
61,64	0,1445	0,2032	0,2718	0,3484	0,4253	—
68,04	0,1331	0,1862	0,2534	0,3212	0,3919	—
85,05	0,1129	0,1578	0,2131	0,2731	0,3331	0,408
102,06	0,0998	0,1398	0,1886	0,2406	0,2981	0,362
119,07	0,0908	0,1272	0,1699	0,2188	0,2708	0,328
136,1	0,0864	0,1177	0,1580	0,2029	0,2513	0,305
153,1	0,0791	0,1107	0,1488	0,1903	0,2357	0,288
170,1	0,0756	0,1053	0,1418	0,1812	0,2243	0,275
187,1	0,0728	0,1014	0,1363	0,1742	0,2157	0,265
204,1	0,0704	0,0983	0,1317	0,1677	0,2078	0,255

Tabela 92. Căldura specifică a propanului la 1 at, în kcal/kmol °K

$T, ^\circ\text{K}$	C_p	$T, ^\circ\text{K}$	C_p	$T, ^\circ\text{K}$	C_p	$T, ^\circ\text{K}$	C_p
250	15,71	450	24,55	800	37,06	1 200	45,50
300	17,64	500	26,75	900	39,64	1 300	46,96
350	19,89	600	30,70	1 000	41,88	1 400	48,24
400	22,24	700	34,11	1 100	43,80	1 500	49,35

Tabela 93. Căldura latentă a propanului, γ , în kcal/kg °C

P, ata	$t, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{kcal/kg}^\circ\text{C}$	P, ata	$t, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{kcal/kg}^\circ\text{C}$
8,505	20,78	78,7	27,22	73,78	50,0
10,21	27,94	75,8	28,92	76,94	47,2
11,91	34,33	73,1	30,62	79,83	44,1
13,61	40,17	70,3	32,32	81,72	41,0
15,31	45,44	67,8	34,02	85,44	37,4
17,01	50,22	65,6	35,72	88,11	33,8
18,71	54,78	63,0	37,42	90,61	30,0
20,41	58,94	60,7	39,12	93,11	25,7
22,11	62,94	58,2	40,82	95,61	20
23,81	66,72	55,5	42,52	98,06	14
25,51	70,33	52,8	42,61*)	98,8*)	0

*) Observație. Determinările din tabela 93 prezintă o disordanță față de proprietățile critice ale propanului determinate ulterior mai exact la $T_c = 96,81^\circ\text{C}$ și $P_c = 42,01 \text{ at}$, datorită dificultăților experimentale și influenței purității materialului asupra poziției punctului critic.

și de izobutan (2-metilpropan). În gazele naturale, termenii nesaturați, în C_4 , butilen -1, butilen -2, și izobutilen, se întâlnesc în mod excepțional și în cantități neglijabile. În cele ce urmează, prin « butan » se înțelege (dacă nu se precizează altfel) amestecul natural de n-butan și de i-butan.

Greutatea moleculară este de 58,078. Greutatea specifică în starea gazoasă este 2,592 kg/m³N; densitatea față de aer — 2,0042. În starea lichidă, densitatea relativă a n-butanului: 0,5824 și a i-butanului: 0,5665, la 15,56°C. La temperaturile corespunzătoare fierberii și la presiunea atmosferică, densitățile sint: 0,599 pentru n-butan și pentru i-butan.

— Puncte caracteristice ale legii de stare: Puncte de topire la presiunea atmosferică:

Tabela 94. Entalpia propanului gazos și a celui lichid la diferite presiuni și la diferite temperaturi, H , kcal, kg.

P, ata	21,11°C	37,78°C	54,44°C	71,11°C	87,78°C	104,44°C	P, ata
1,701	89,9	96,9	104,1	111,4	119,1	126,9	1,701
3,402	89,2	96,3	103,4	110,8	118,5	126,4	3,402
5,103	87,9	95,3	102,5	109,9	117,8	125,6	5,103
6,804	86,1	94,0	101,6	109,1	116,9	124,8	6,804
8,505	82,5	92,4	100,4	108,3	116,0	124,0	8,505
10,21	—	90,5	99,1	107,3	115,1	123,1	10,21
11,91	—	88,2	97,9	106,3	114,1	122,3	11,91
13,61	—	15,09	96,7	105,2	113,3	121,5	13,61
15,31	—	—	95,3	104,1	112,4	120,6	15,31
17,01	—	—	93,1	103,0	111,4	119,8	17,01
18,71	—	—	—	101,7	110,5	118,9	18,71
20,41	3,70	15,00	26,87	100,4	109,6	118,0	20,41
23,81	—	—	—	96,1	107,4	116,4	23,81
27,22	3,70	14,95	26,66	39,61	104,8	114,7	27,22
30,62	—	—	—	—	101,3	112,9	30,62
34,02	—	—	—	—	95,6	111,0	34,02
37,42	—	—	—	—	56,3	108,8	37,42
40,82	3,71	14,89	26,37	38,62	55,24	105,6	40,82
51,03	—	14,88	26,17	37,97	53,08	—	51,03
68,04	3,95	14,91	26,06	37,54	51,88	74,59	68,04
85,05	—	15,00	26,01	37,22	50,90	—	85,05
102,1	4,22	15,13	26,05	37,04	50,24	69,16	102,1
119,1	—	15,38	26,13	36,97	49,78	—	119,1
136,1	4,61*)	15,57	26,26	36,97	49,45	66,79	136,1
170,1	5,32**)	16,03	26,60	37,14	49,06	65,13	170,1
204,1	5,70***)	16,56	26,81	37,45	48,96	64,74	204,1

Observație: Valorile notate cu (*) corespund fazei lichide.

Tabela 95. Entalpia propanului la starea de echilibru de fierbere, kcal/kg.

P, ata	$t, ^\circ\text{C}$	H_{vap}	H_{lic}	P, ata	$t, ^\circ\text{C}$	H_{vap}	H_{lic}
8,505	20,78	82,1	3,4	27,22	73,78	92,0	42,0
10,21	27,94	84,0	8,2	28,92	76,94	92,0	44,8
11,91	34,33	85,7	12,6	30,62	79,83	91,9	47,8
13,61	40,17	87,1	16,8	32,32	81,72	91,7	50,7
15,31	45,44	88,3	20,5	34,02	85,44	91,4	54,0
17,01	50,22	89,4	23,8	35,72	88,11	91,1	57,3
18,71	54,78	90,2	27,2	37,42	90,61	90,7	60,7
20,41	58,94	90,9	30,2	39,12	93,11	90,3	64,6
22,11	62,94	91,4	33,2	40,82	95,61	89,0	68,7
23,81	66,72	91,7	36,2	42,52	98,06	88,0	74
25,51	70,33	91,9	39,1				

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE SISTEMELOR FLUIDE

303

— 135°C (n-butan), respectiv — 145°C (iso-butan).

Puncte de fierbere la presiunea atmosferică:
— 0,5°C (n-butan), respectiv — 11,7°C (iso-butan).

Puncte critice: $T_c = 425,14^\circ\text{K} = 152,01^\circ\text{C}$ (n-butan), respectiv $406,83^\circ\text{K} = 133,70^\circ\text{C}$ (i-butan);

$P_c = 37,47$ ata $\approx 38,76$ kg/cm² (n-butan), respectiv 36,5 ata = 38,1 kg/cm² (abs) (isobutan);

Tabela 96. Entropia propanului în stare lichidă și gazoasă în funcție de presiune și temperatură, S , kcal/kg°C

P , ata	21,11°C	37,78°C	54,44°C	71,11°C	87,78°C	104,44°C	P , ata
1,701	0,3716	0,3959	0,4172	0,4403	0,4608	0,4814	1,701
3,402	0,3389	0,3625	0,3850	0,4071	0,4281	0,4489	3,402
5,103	0,3176	0,3415	0,3653	0,3876	0,4087	0,4294	5,103
6,804	0,3002	0,3255	0,3506	0,3733	0,3946	0,4149	6,804
8,505	0,2810	0,3119	0,3382	0,3615	0,3826	0,4032	8,505
10,21	—	0,2989	0,3272	0,3508	0,3725	0,3933	10,21
11,91	—	0,2872	0,3176	0,3427	0,3537	0,3845	11,91
13,61	—	0,05043*	0,3085	0,3345	0,3559	0,3768	13,61
15,31	—	—	0,3000	0,3270	0,3491	0,3698	15,31
17,01	—	—	0,2909	0,3199	0,3428	0,3633	17,01
18,71	—	—	—	0,3130	0,3363	0,3573	18,71
20,41	0,0109*	0,04904*	0,08599*	0,3059	0,3304	0,3518	20,41
23,81	—	—	—	0,2894	0,3191	0,3422	23,81
27,22	0,0100*	0,04776*	0,08427*	0,1230*	0,3079	0,3336	27,22
30,62	—	—	—	—	0,2952	0,3258	30,62
34,02	—	—	—	—	0,2771	0,3177	34,02
37,42	—	—	—	—	—	0,3087	37,42
40,82	0,0081*	0,04539*	0,08117*	0,1177*	0,1645*	0,2981	40,82
51,03	—	0,04319*	0,07841*	0,1135*	0,1563*	—	51,03
68,04	0,0045*	0,04114*	0,07590*	0,1101*	0,1507*	0,2116	68,04
85,05	—	0,03875*	0,07308*	0,1065*	0,1451*	—	85,05
102,1	0,0003*	0,03651*	0,07053*	0,1033*	0,1406*	0,1923	102,1
118,1	—	0,03440*	0,06818*	0,1005*	0,1367*	—	118,1
136,1	0,0033*	0,03241*	0,06597*	0,09794*	0,1332*	0,1808	136,1
170,1	0,0066*	0,02871*	0,06189*	0,09338*	0,1271*	0,1714	170,1
204,1	0,0094*	0,02529*	0,05823*	0,08938*	0,1219*	0,1645	204,1

Observație: Valorile notate cu (*) se referă la faza lichidă.

Tabela 97. Entropia propanului în stare lichidă și de vapori saturați, S , în kcal/kg°C

P , ata	t , °C	S_{vap}	S_{lic}	P , ata	t , °C	S_{vap}	S_{lic}
8,505	20,78	0,2800	0,0123	27,22	73,78	0,2740	0,1300
10,12	27,94	0,2801	0,0287	28,92	76,94	0,2725	0,1380
11,91	34,33	0,2802	0,0428	30,62	79,83	0,2708	0,1461
13,61	40,17	0,2803	0,0556	32,32	81,72	0,2691	0,1542
15,31	45,44	0,2804	0,0671	34,02	85,44	0,2673	0,1624
17,01	50,22	0,2802	0,0776	35,72	88,11	0,2653	0,1715
18,71	54,78	0,2797	0,0871	37,42	90,61	0,2632	0,1801
20,41	58,94	0,2790	0,0960	39,11	93,11	0,2610	0,1873
22,11	62,94	0,2780	0,1048	40,82	95,61	0,258	0,201
23,81	66,72	0,2769	0,1131	42,52	98,06	0,253	0,214
25,51	70,33	0,2753	0,1216				

Tabela 98. Coeficienți de răcire prin detentă adiabatică, ai propanului, α , °C at.

P , ata	21,1°C	37,8°C	54,4°C	71,1°C	87,8°C	104,4°C	P , ata
Vapori saturați	2,48	2,19	2,11	2,06	1,77	—	Vapori saturați
1,701	1,76	1,49	1,26	1,09	0,95	0,84	1,701
3,402	1,97	1,63	1,35	1,17	1,01	0,85	3,402
6,804	2,31	1,83	1,52	1,30	1,09	0,90	6,804
10,21	—	2,02	1,68	1,41	1,17	0,95	10,21
13,61	—	—	1,84	1,51	1,23	1,00	13,61
17,01	—	—	2,02	1,62	1,29	1,05	17,01
20,41	—	—	—	1,76	1,35	1,10	20,41
23,81	—	—	—	1,92	1,42	1,15	23,81
27,22	—	—	—	—	1,48	1,19	27,22
30,62	—	—	—	—	1,57	1,22	30,62
34,02	—	—	—	—	1,70	1,26	34,02
37,42	—	—	—	—	—	1,27	37,42

$\gamma_c = 225 \text{ kg/m}^3$, $V_c = 4,444 \text{ l/g}$, pentru butan *) normal.

Indice de refracție în starea lichidă:

$n_D = 1,3562$ pentru n-butan la -15°C ;

$n_D = 1,3514$ pentru i-butan la -25°C .

— Presiunea de vapori a n-butanului, în funcție de temperatură, este cunoscută cu o precizie mai redusă, din cauza dificultății de a izola n-butanul de izomerul lui și de eventualii omologi nesaturați. După diferiți autori, ea este:

$$\log P_{(\text{mm})} = -\frac{2\,352,900}{T} - \log T + 0,01111869 T + 48,64763; \quad (157)$$

$$\log P_{(\text{mm})} = 6,88032 - \frac{968,098}{242,555 + t}; \quad (158)$$

$$\log P_{(\text{mm})} = -\frac{1\,744,65}{T} - 4,8193 \log T + 21,01654; \quad (159)$$

$$\log P_{(\text{mm})} = 6,50533 - \frac{827,690}{228,909 + t}; \quad (160)$$

$$\log P_{(\text{mm})} = -\frac{1\,692,96}{T} - 3,9876 \log T + 18,80151; \quad (161)$$

unde:

$P_{(\text{mm})}$ este presiunea de vapori a n-butanului, în mm col.Hg;

T — temperatura absolută, respectiv t = temperatura, în $^\circ\text{C}$.

$$\log P_{(\text{at})} = 4,11248 - \frac{1\,030,34}{251,041 + t}; \quad (162)$$

$$\log P_{(\text{at})} = 4,76902 - \frac{1\,513,30}{321,493 + t}; \quad (163)$$

Comparația rezultatelor lor cu valorile determinate experimental este dată în tabelele 100 și 101.

Se observă că în domeniul $-78^\circ\text{C} \dots 0^\circ\text{C}$ sînt preferabile rezultatele ecuației 158, dar în domeniul $-60^\circ\text{C} \dots 0^\circ\text{C}$, acelea ale ecuației (157).

Se observă că în domeniul $-68^\circ\text{C} \dots +6^\circ\text{C}$ este preferabilă ecuația (159).

Ecuația (161) este propusă pentru intervalul $0^\circ\text{C} \dots +75^\circ\text{C}$, iar ecuația (162), pentru $+75^\circ\text{C} \dots +150^\circ\text{C}$, cu erori medii de $\pm 0,1\%$, respectiv $\pm 0,3\%$.

Pentru presiunea de vapori a isobutanului s-au propus:

$$\log P_{(\text{mm})} = -\frac{1\,600,84}{T} - 3,9392 \log T + 18,52561; \quad (164)$$

$$\log P_{(\text{mm})} = -\frac{1\,716,687}{T} - 6,38879 \log T + 0,0024132 T + 24,260325; \quad (165)$$

$$\log P_{(\text{mm})} = 6,82825 - \frac{916,054}{243,783 + t}; \quad (166)$$

$$\log P_{(\text{mm})} = 4,3061 - \frac{1\,119,7}{271,75 + t}; \quad (167)$$

Comparațiile rezultatelor cu cele experimentale sînt date în tabelele 101 și 102.

Se observă că în intervalul $-85^\circ\text{C} \dots -11^\circ\text{C}$ este preferabilă ecuația (164) care, de altfel, este și mai ușor de folosit decît (165). Ecuația (166), simțitor mai expeditivă, este mai puțin satisfăcătoare. De asemenea în ce privește ecuația 167, (v. tabela 102), care este singura disponibilă pentru temperaturile înalte ale domeniului subcritic.

Tabela 99. Comparația datelor ecuațiilor (157) și (158) cu rezultatele experimentale

$t, ^\circ\text{C}$	P_{obs} mm col. Hg	P calculată		ΔP , abaterea între P_{obs} și $P_{(157)}$		ΔP , abaterea între P_{obs} și $P_{(158)}$	
		cu (157)	cu (158)	mm col. Hg	%	mm col. Hg	%
-78,043	9,90	9,593	9,90	+0,308	+3,10	0,00	0,00
-60,482	36,26	36,277	36,58	-0,017	-0,05	-0,32	-0,88
-46,874	85,59	85,669	85,70	-0,079	-0,09	-0,11	-0,12
-37,328	145,58	145,57	145,58	+0,010	+0,01	0,00	0,00
-26,639	249,53	249,484	249,25	+0,046	+0,02	+0,28	+0,11
-16,966	388,77	388,761	388,39	+0,009	0,00	+0,38	+0,10
-10,883	503,34	503,317	503,00	+0,023	0,00	+0,34	+0,07
-6,361	604,97	605,025	604,74	-0,028	-0,01	+0,23	+0,04
-2,753	687,13	697,146	697,01	-0,016	0,00	+0,12	+0,02
-1,123	742,20	748,183	742,15	+0,017	0,00	+0,05	+0,01
-0,334	764,50	764,535	764,52	-0,035	-0,01	-0,02	0,00
	Abatere medie				0,47 %		0,17 %
	Abatere maximă				3,1 %		0,88 %

*) După alți autori, $V_c = 258 \text{ m}^3/\text{kmol}$.

Tabela 100. Comparația datelor ecuațiilor (159) și (160) cu rezultatele experimentale

$t, ^\circ\text{C}$	P_{obs} mm col. Hg	$P_{\text{calculată}}$		$P_{\text{obs}} - P_{159}$		$P_{\text{obs}} - P_{160}$	
		cu (159)	cu (160)	mm col. Hg	%	mm col. Hg	%
-67,7	23,5	24,0	23,50	- 0,5	- 2,1	0,0	0,0
-60,0	42,5	40,8	40,3	+ 1,7	+ 4,0	+ 2,2	+ 5,2
-45,0	99,6	100,1	100,1	- 0,5	- 0,5	- 1,5	- 1,5
-31,3	207,4	207,3	207,4	+ 0,1	+ 0,0	0,0	0,0
-22,7	310,9	309,9	310,1	+ 1,0	+ 0,3	+ 0,8	+ 0,2
-17,7	384,5	385,7	385,9	- 1,2	- 0,3	- 1,4	- 0,4
-11,3	498,0	502,7	503,2	- 4,7	- 0,9	- 5,2	- 1,0
- 7,1	589,3	593,1	594,0	- 3,8	- 0,6	- 4,7	- 0,8
0,0	775,4	773,4	775,4	+ 2,0	+ 0,3	0,0	0,0
+ 5,6	955,0	942,3	945,9	+ 12,7	+ 1,3	+ 9,1	+ 1,0
Abatere medie					+ 1,0%		+ 1,0 %
Abatere maximă					+ 4,0 %		+ 5,2 %

Tabela 101

$t, ^\circ\text{C}$	P_{obs}	$P_{\text{calculată}}$		$P_{\text{obs}} - P_{\text{calculată}}$ cu (164)		$P_{\text{obs}} - P_{\text{calculată}}$ cu (165)	
		cu (164)	cu (165)	mm col Hg	%	mm col Hg	%
-85,090	11,37	11,379	11,37	- 0,009	- 0,08	0,00	0,00
-71,706	31,96	31,993	31,97	+ 0,033	+ 0,10	- 0,01	- 0,03
-56,431	86,85	86,867	86,85	+ 0,003	0,00	0,00	0,00
-44,107	174,26	174,27	174,00	- 0,01	- 0,01	+ 0,26	+ 0,15
-27,576	391,02	391,07	390,23	- 0,05	- 0,01	+ 0,79	+ 0,20
-22,070	498,08	498,08	497,69	0,00	0,00	+ 0,39	+ 0,08
-18,761	572,67	572,67	571,89	0,00	0,00	+ 0,78	+ 0,14
-13,238	716,13	716,17	715,85	- 0,04	- 0,01	+ 0,28	+ 0,04
-11,609	763,44	763,39	763,31	+ 0,05	+ 0,01	+ 0,12	+ 0,02
Abatere medie					0,04 %		0,11%
Abatere maximă					+ 0,10 %		+ 0,20%

Tabela 102. Comparația tensiunilor de vapori ale izobutanului măsurate experimental cu cele calculate cu relația (167)

t°, C	P_{obs} ata	P calculată ata	Abaterea P_{obs} față de $P_{calc.}$	
			ata	%
17,22	2,72	2,70	+ 0,02	+ 0,74
24,72	3,40	3,38	+ 0,02	+ 0,59
31,17	4,08	4,07	+ 0,01	+ 0,24
36,78	4,76	4,75	+ 0,01	+ 0,21
41,84	5,44	5,43	+ 0,01	+ 0,18
46,39	6,12	6,12	0,00	0,00
51,00	6,80	6,87	- 0,07	- 1,03
59,88	8,50	8,51	- 0,01	- 0,12
67,89	10,20	10,22	- 0,02	- 0,20
75,00	11,90	11,94	- 0,04	- 0,32
81,28	13,61	13,63	- 0,02	- 0,15
87,06	15,31	15,33	- 0,02	- 0,13
92,39	17,01	17,03	- 0,02	- 0,12
97,39	18,71	18,74	- 0,03	- 0,16
102,00	20,41	20,43	- 0,02	- 0,10
106,39	22,11	22,13	- 0,02	- 0,09
110,56	23,81	23,84	- 0,03	- 0,13
114,50	25,21	25,54	- 0,03	- 0,12
118,28	27,72	27,24	- 0,02	- 0,07
Abatere medie				0,28%
Abatere maximă				- 1,03%

— Legea de stare $F(P, v, T) = 0$, exprimabilă analitic în domeniul de presiuni și de temperaturi în care gazul are o comportare

mai mult sau mai puțin apropiată de aceea a gazelor perfecte (domeniul stării gazoase, vapori nesaturanți, în cea mai mare parte și domeniul stării lichide, în foarte mică măsură), prezintă un interes mai redus în cazul butanilor ca și în acela al omologilor superiori, deoarece, chiar în starea pură, și cu atât mai mult în sistemele complexe, ei se găsesc în stare de lichid în echilibru cu vapori, în cea mai mare parte a domeniului de temperaturi și de presiuni întâlnite în zăcămintele. În aceste domenii, legea de stare este cunoscută practic numai prin valori experimentale, în general sub forma $v = f(P, T)$.

Pentru starea gazoasă (vapori nesaturați) a *n*-butanului s-a propus legea (121) cu coeficienții:

I fie:

$$\begin{aligned} B_0 &= 0,124361; & A_0 &= 10,0847; \\ C_0 &= 992830; & b &= 0,0399983; \\ a &= 1,88231; & C &= 316400; \\ \gamma &= 0,0340; & \alpha &= 0,00110132; \end{aligned}$$

II fie:

$$\begin{aligned} B_0 &= (0,499147)^3; & A_0 &= (3,17564)^2; \\ C_0 &= (0,996410)^2; & b &= (0,341990)^3; \\ a &= (1,23471)^3; & C &= (6\,814,15)^3; \\ \gamma &= (0,184391)^2; & \alpha &= (0,103269)^2; \end{aligned}$$

În domeniul bifazic și în cel învecinat, legea este reprezentată prin valorile experimentale

$$\nu = f_1(P, T); \quad V = \varphi_1(P, T); \quad \frac{1}{\nu} =$$

$$= \gamma = f_2(P, T); \quad d = \frac{1}{\nu} = \varphi_2(P, T),$$

etc., (v. tabelele (103) pentru diferite domenii de P și T).

— Legea de stare a izobutanului, mai puțin studiată, este foarte apropiată de aceea a n -butanului în domeniul temperaturilor înalte și al presiunilor joase. În domeniul presiunilor

și al temperaturilor de zăcămint, ea este dată de valorile $\nu = f(P, t)$ din tabela 110.

— Viscositatea n -butanului, în funcție de temperatură și de presiune, în gama temperaturilor și (în parte) a presiunilor de zăcămint, este dată în tabela 111, iar aceea a izobutanului, în tabela 112.

— Fugacitate-activitate. Fugacitatea în gama de presiuni și de temperaturi întâlnite în zăcămint este dată în tabela 113 pentru n -butan, respectiv 114 pentru izobutan.

— Coeficienții de echilibru ai butanilor, foarte apropiați între ei, funcții nu numai de presiune și de temperatură, ci și de compoziția

Tabela 103. Greutatea specifică a n -butanului gazos în echilibru cu lichidul și volumul său specific, în funcție de presiune și temperatură, în apropierea punctului critic, d , kmoli/m³, V , m³/kmol

$\frac{d}{\text{kmol}} \frac{m^3}{m^3}$	$\frac{V}{m^3} \frac{m^3}{\text{kmol}}$	Presiunea în ata, la temperatura :							
		151,90°C	151,95°C	152,00°C	152,01°C	152,02°C	152,04°C	152,07°C	152,10°C
2,860	0,3497	—	—	37,2195	—	—	—	—	—
2,994	0,3340	—	—	37,3400	—	—	—	—	—
3,142	0,3183	37,3340	37,3650	37,3885	—	—	37,4090	37,4255	37,4395
3,305	0,3026	37,3770	37,4055	37,4315	—	—	37,4565	37,4690	37,4895
3,488	0,2869	37,3985	37,4260	37,4550	37,4595	37,4640	37,4775	37,4965	37,5105
3,583	0,2791	37,4025	37,4285	—	37,4670	37,4720	—	—	—
3,687	0,2712	37,4035	37,4355	37,4635	37,4715	37,4760	37,4885	37,5085	37,5220
3,741	0,2673	—	—	37,4655	37,4730	37,4780	—	—	—
3,797	0,2634	37,4055	37,4350	37,4685	37,4740	37,4785	37,4905	37,5110	37,5250
3,885	0,2594	—	—	37,4680	37,4735	37,4800	—	—	—
3,914	0,2555	37,4055	37,4370	37,4685	37,4740	37,4815	37,4958	37,5125	37,5275
3,975	0,2516	—	—	37,4690	37,4745	37,4825	—	—	—
4,030	0,2476	37,4035	37,4390	37,4695	37,4765	37,4835	37,4960	37,5170	37,5315
4,103	0,2437	37,4055	37,4405	—	37,4785	37,4845	—	—	—
4,170	0,2398	37,4085	37,4420	37,4730	37,4800	37,4875	37,5000	37,5220	37,5380
4,310	0,2320	37,4350	37,4490	37,4790	37,4860	37,4945	—	—	—
4,462	0,2241	37,4235	37,4590	37,4915	37,4980	37,5045	37,5165	38,5415	37,5380
4,625	0,2162	37,4460	—	—	—	—	—	—	—
4,798	0,2084	—	—	37,5875	—	—	—	—	37,7875

Tabela 104. Relația $P = f(t, d)$ pentru n -butan în starea de vapori nesaturați la presiuni inferioare celei critice, cu P în ata, t în °C și d în kmoli/m³

$t, ^\circ\text{C}$	Presiunea în funcție de d						
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
150	14,68	24,68	30,94	34,39	35,93	—	—
175	15,91	27,50	35,68	41,31	45,15	47,89	50,08
200	17,11	30,24	40,22	47,88	53,92	58,99	63,65
225	18,30	32,92	44,67	54,29	62,50	69,93	77,21
250	19,48	35,55	49,01	60,62	70,93	80,74	90,67
275	20,65	38,18	53,33	66,82	79,34	91,58	104,25
300	21,81	40,76	57,58	72,97	87,63	102,28	117,70

Tabela 105. Relația $P = f(t, d)$ pentru n -butan în starea de gaz la presiuni și la temperaturi superioare celei critice: cu P , în ata, t , în °C și d în kmoli/m³.

$t, ^\circ\text{C}$	Presiunea în funcție de d												$t, ^\circ\text{C}$
	$d=4,0$	$d=4,5$	$d=5,0$	$d=4,0$	$d=5,0$	$d=5,5$	$d=5,0$	$d=5,5$	$d=7,0$	$d=7,5$	$d=8,0$	$d=8,5$	
152,01	—	—	—	37,46	37,76	39,15	43,40	53,34	73,27	108,96	168,11	260,68	152,01
175	15,17	54,63	58,14	52,20	58,39	64,19	74,32	51,67	120,39	167,29	239,49	347,02	175
200	68,49	74,16	81,58	68,61	81,96	92,87	109,23	134,39	172,87	230,71	315,71	—	200
225	84,99	94,12	105,74	85,20	106,23	122,28	145,02	177,85	225,65	294,94	—	—	225
250	101,52	114,24	130,17	101,84	130,80	152,09	181,11	221,62	278,51	358,53	—	—	250
275	118,23	134,60	154,78	118,57	155,59	188,14	217,50	265,55	331,50	—	—	—	275
300	134,87	154,88	179,44	135,27	180,56	212,36	253,96	309,56	—	—	—	—	300

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE SISTEMELOR FLUIDE

307

Tabela 106. Relația $P = f(v, t)$ a n-butanului în faza garosă, cu P , în ata: V , în dm^3/kg , t în $^{\circ}\text{C}$

$t, ^{\circ}\text{C}$	Presiunea, în ata, pentru volumele specifice, în dm^3/kg														
	242,5	202,8	187,3	300,7	151,1	140,5	124,9	123,3	93,63	87,46	81,16	74,82	68,57	62,43	50,19
37,76	1,90	2,03	2,20	2,38	2,62	2,87	3,19	—	—	—	—	—	—	—	—
65,66	2,09	2,25	2,42	2,63	2,88	3,18	3,54	4,01	4,61	4,89	5,25	5,60	6,06	6,55	7,18
93,33	2,28	2,44	2,64	2,87	3,14	3,47	3,88	4,40	5,08	5,40	5,77	6,20	6,70	7,29	7,98
121,11	2,46	2,65	2,86	3,11	3,41	3,77	4,22	4,78	5,52	5,89	6,30	6,78	7,34	7,99	8,77
148,89	2,65	2,86	3,08	3,35	3,67	4,07	4,55	5,16	5,97	6,38	6,83	7,35	7,97	8,71	9,58
176,67	2,84	3,05	3,29	3,59	3,93	4,35	4,88	5,54	6,48	6,95	7,55	8,19	8,90	9,71	10,57
204,44	3,01	3,25	3,50	3,82	4,20	4,64	5,18	5,93	6,97	7,53	8,20	8,96	9,74	10,63	11,57
232,22	3,20	3,44	3,72	4,06	4,45	4,93	5,53	6,30	7,31	7,88	8,60	9,44	10,32	11,27	12,25
260,00	3,38	3,63	3,93	4,29	4,70	5,22	5,85	6,67	7,76	8,37	9,24	10,18	11,15	12,15	13,19
287,78	3,56	3,83	4,14	4,51	4,96	5,50	6,18	7,04	8,19	8,76	9,64	10,64	11,65	12,70	13,77
315,66	3,74	4,02	4,35	4,75	5,21	5,78	6,50	7,41	8,61	9,22	9,91	10,72	11,67	12,79	13,92

Tabela 107. Relația $t = f(P, v)$ pentru n-butan, în gama densităților mici, în $t, ^{\circ}\text{C}$; P în ata v în dm^3/kg

$t, ^{\circ}\text{C}$	Presiunea, în ata, pentru volumele specifice, în dm^3/kg														
	34,34	31,22	28,09	24,97	21,85	18,63	17,17	15,60	14,05	12,49	11,86	11,24	10,61	9,999	9,564
93,33	11,89	18,73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
121,11	13,29	14,36	15,50	16,83	18,47	20,28	21,35	22,98	24,69	26,69	28,94	30,96	31,71	32,44	35,1
148,89	14,69	15,86	17,28	18,31	20,87	23,24	24,58	26,73	28,63	31,79	35,35	36,44	37,6	38,9	40,1
176,67	16,06	17,42	19,02	20,92	23,28	26,13	27,73	29,63	31,09	33,8	36,84	40,23	43,3	44,94	46,7
204,44	17,43	18,94	20,73	22,88	25,52	28,92	30,83	33,09	35,8	39,6	43,24	46,71	48,68	50,8	53,11
232,22	18,78	20,75	22,42	24,80	27,79	31,90	33,8	36,5	39,5	43,4	47,59	51,68	54,02	56,5	59,5
260,00	20,09	21,92	24,07	26,72	30,04	34,23	36,7	39,6	43,0	47,1	51,5	54,06	59,2	62,22	65,5
287,78	21,58	23,57	25,68	28,6	32,25	36,7	39,6	43,0	47,1	51,5	54,06	56,51	59,2	62,22	65,5
315,66	22,66	24,77	27,25	30,4	34,4	39,22	42,49	46,1	50,6	56,1	61,3	64,28	67,6	71,5	75,97

Tabela 107. Relația $t = f(P, v)$ pentru n-butan, în gama densităților mici, în $t, ^{\circ}\text{C}$; P în ata v în dm^3/kg

P ata	$t, ^{\circ}\text{C}$ pentru diferite volume specifice														
	6,867	6,243	5,619	4,994	4,682	4,370	3,746	3,122	2,809	2,653	2,497	2,341	2,263	2,185	2,167
27,22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
34,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
40,82	163,3	161,2	159,5	158,9	158,0	157,6	156,6	153,6	148,9	140,6	130,1	121,7	115,7	108,7	100,0
47,63	182,0	177,7	173,9	170,9	169,9	168,5	165,2	159,9	153,9	144,7	133,9	124,6	118,3	110,9	102,1
54,43	201,3	194,6	188,8	183,8	181,5	179,0	173,0	166,0	158,4	148,4	141,2	130,6	125,4	115,6	105,8
61,24	220,9	211,8	203,8	196,4	193,1	189,8	182,3	172,1	165,3	156,7	148,4	136,7	128,7	119,7	107,8
68,04	240,8	229,4	218,8	209,1	204,6	200,4	190,7	178,1	167,8	160,8	151,8	139,9	131,1	122,1	111,7
74,84	269,8	246,7	233,9	221,8	216,1	210,8	199,3	184,3	172,7	164,9	155,1	142,8	134,0	124,6	114,0
81,64	281,0	263,9	249,2	234,6	227,8	221,3	207,7	190,1	178,3	168,9	158,3	145,9	137,7	128,0	117,2

Tabela 103. Relația $v = f(P, t)$ pentru *n*-butan, în gama de temperaturi și de presiuni întâlnite în zăcămintele v , în dm^3/kg , P , în ata , t , în $^{\circ}\text{C}$

P , ata	Volumul specific la temperatura:							P , ata
	21,1 $^{\circ}\text{C}$	37,8 $^{\circ}\text{C}$	54,4 $^{\circ}\text{C}$	71,1 $^{\circ}\text{C}$	87,8 $^{\circ}\text{C}$	104,4 $^{\circ}\text{C}$	101,1 $^{\circ}\text{C}$	
Vapori în echilibru cu lichidul	181,5	112,37	72,52	48,35	32,93	22,50	15,09	Vapori în echilibru cu lichidul:
Lichid	1,719	1,783	1,850	1,929	2,036	2,170	2,370	Vapori
1,00	402,7	427,5	451,8	476,2	500,3	524,3	548,1	1,00
1,36	292,2	311,0	329,2	347,4	365,3	383,1	400,7	1,36
2,04	190,0	203,3	215,9	228,4	240,7	252,7	264,7	2,04
2,72	—	149,2	159,1	168,8	178,2	187,5	196,6	2,72
3,40	—	116,55	125,0	133,0	140,8	148,4	155,8	3,40
4,08	—	—	102,12	109,11	115,80	122,26	128,5	4,08
4,76	—	—	85,75	92,03	97,94	103,64	109,16	4,76
5,44	—	—	73,36	79,17	84,57	89,68	94,61	5,44
6,12	—	—	—	69,12	74,08	78,82	83,28	6,12
6,80	—	—	—	61,08	65,74	70,12	74,27	6,80
8,51	—	—	—	—	50,54	54,41	57,97	8,51
10,21	—	—	—	—	40,34	43,84	47,04	10,21
11,91	—	—	—	—	—	36,15	39,14	11,91
13,61	—	—	—	—	—	30,24	33,11	13,61
15,31	—	—	—	—	—	25,48	28,28	15,31
17,01	1,710	1,772	1,839	1,917	2,025	2,168	24,35	17,01
18,71	—	—	—	—	—	—	21,01	18,71
20,41	—	—	—	—	—	—	18,13	20,41
34,02	1,700	1,761	1,824	1,896	1,996	2,121	2,303	34,02
51,03	1,691	1,751	1,811	1,879	1,971	2,085	2,232	51,03
68,04	1,684	1,741	1,799	1,863	1,948	2,050	2,179	68,04
85,1	1,677	1,732	1,788	1,847	1,927	2,018	2,138	85,1
102,1	1,671	1,723	1,776	1,834	1,908	1,995	2,104	102,1
119,1	1,664	1,761	1,766	1,821	1,892	1,973	2,075	119,1
136,1	1,658	1,708	1,757	1,809	1,876	1,955	2,049	136,1
153,1	1,652	1,701	1,747	1,798	1,862	1,937	2,027	153,1
170,1	1,647	1,692	1,739	1,788	1,849	1,920	2,008	170,1
187,1	1,643	1,686	1,730	1,779	1,841	1,907	1,990	187,1
204,1	1,641	1,680	1,723	1,772	1,827	1,895	1,973	204,1

Tabela 109. Relația $v = f(P, t)$ pentru *n*-butan, în gama de temperaturi și de presiuni întâlnite în zăcămintele v , în dm^3/kg , P în ata , t , $^{\circ}\text{C}$

P , ata	Volumul specific la temperatura:							P , ata
	37,78	71,11	104,44	137,78	171,11	204,44	237,78	
Vapori în echilibru cu lichidul:	1,795	1,948	2,178	2,686	—	—	—	Vapori în echilibru cu lichidul:
Vapori	112,6	48,91	23,20	10,31	—	—	—	Vapori
Lichid	—	—	—	—	—	—	—	Lichid
0,680	632,8	704,6	775,8	846,4	916,7	986,8	1 056,6	0,680
1,000	426,6	476,5	525,3	573,9	622,1	670,1	737,9	1,000
1,361	310,2	347,4	383,9	420,0	455,8	481,3	526,5	1,361
2,041	202,6	228,3	253,3	277,9	302,2	326,1	349,9	2,041
2,722	148,8	168,8	188,0	206,8	225,3	243,5	261,5	2,722
4,062	1,794	109,1	122,6	130,7	148,5	160,9	173,2	4,062
6,804	1,792	61,32	70,21	78,76	86,96	94,83	102,5	6,804
10,21	1,790	1,945	43,81	50,17	56,14	61,75	67,09	10,21
13,61	1,787	1,940	30,37	35,77	40,69	45,17	49,40	13,61
17,01	1,785	1,936	2,176	27,00	31,36	35,21	38,78	17,01
20,41	1,782	1,932	2,165	21,01	25,10	28,54	31,69	20,41
27,22	1,778	1,923	2,144	12,88	17,11	20,15	22,78	27,22
34,02	1,774	1,915	2,126	2,591	12,07	15,05	17,42	34,02
40,82	1,769	1,908	2,110	2,502	8,366	11,58	13,84	40,82
54,43	1,761	1,894	2,079	2,392	3,469	7,148	9,332	54,43
68,04	1,753	1,881	2,053	2,322	2,897	4,685	6,726	68,04
85,05	1,744	1,867	2,025	2,257	2,650	3,490	4,870	85,05
102,1	1,736	1,853	2,001	2,207	2,518	3,058	3,936	102,1
119,1	1,728	1,840	1,979	2,165	2,429	2,836	3,441	119,1
136,1	1,720	1,829	1,960	2,131	2,363	2,696	3,156	136,1
170,1	1,706	1,807	1,928	2,075	2,264	2,515	2,827	170,1
204,1	1,694	1,789	1,900	2,030	2,193	2,397	2,640	204,1
238,1	1,682	1,772	1,876	1,995	2,138	2,312	2,514	238,1
272,2	1,672	1,758	1,855	1,954	2,091	2,245	2,420	272,2
306,2	1,663	1,744	1,835	1,938	2,054	2,190	2,346	306,2
340,2	1,654	1,732	1,818	1,914	2,020	2,144	2,286	340,2
408,2	1,636	1,707	1,787	1,873	1,965	2,071	2,193	408,2
476,3	1,621	1,687	1,761	1,837	1,920	2,013	2,119	476,3
544,3	1,608	1,668	1,736	1,807	1,885	1,968	2,069	544,3
612,4	1,594	1,651	1,715	1,782	1,862	1,930	2,011	612,4
680,4	1,582	1,636	1,696	1,757	1,822	1,893	1,971	680,4

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE SISTEMELOR FLUIDE

309

Tabela 110. Relația $v = f(P, t)$ a izobutanului, în domeniul temperaturilor și al presiunilor întâlnite în zăcămintele
 P , în ata; t , în °C; v , în dm³/kg

P, ata	Volumul specific, în dm ³ /kg, la temperatură, în °C							P, ata
	21,1	37,8	54,4	71,1	87,8	104,4	121,1	
In echilibru:								
Lichid	123,3	77,81	50,71	33,94	23,02	15,46	9,61	Lichid
Vapori	1,787	1,861	1,947	2,051	2,189	2,372	2,640	Vapori
0,68	599,8	635,2	670,1	704,9	740,0	774,8	809,4	0,68
1,00	404,7	429,0	453,1	477,0	500,9	524,6	548,3	1,00
1,36	294,4	312,6	330,5	348,2	365,8	383,4	400,9	1,36
2,04	192,0	204,7	217,0	229,1	241,0	252,9	264,7	2,04
2,72	140,4	150,5	160,1	169,5	178,6	187,7	196,7	2,72
3,40	—	117,9	125,9	133,6	141,1	148,5	155,9	3,40
4,08	—	96,01	103,06	109,72	116,12	122,48	128,7	4,08
5,44	—	—	74,32	79,39	84,92	89,92	94,76	5,44
6,80	—	—	56,94	61,73	66,18	70,41	74,45	6,80
8,51	—	—	—	47,18	51,09	54,76	58,20	8,51
10,21	—	—	—	37,35	4,093	44,27	47,35	10,21
11,91	—	—	—	—	33,66	36,76	39,67	11,91
13,61	—	—	—	—	28,12	31,07	33,66	13,61
15,31	—	—	—	—	23,69	26,55	29,04	15,31
17,01	1,778	1,852	1,935	2,038	2,184	22,78	25,27	17,01
18,71	—	—	—	—	—	19,60	22,11	18,71
20,41	—	—	—	—	—	16,83	19,42	20,41
23,81	—	—	—	—	—	—	15,08	23,81
27,22	—	—	—	—	—	—	11,7	27,22
34,02	1,767	1,837	1,914	2,007	2,136	2,296	2,567	34,02
51,03	1,757	1,823	1,895	1,982	2,093	2,226	2,419	51,03
68,04	1,747	1,810	1,879	1,960	2,060	2,175	2,329	68,04
85,1	1,739	1,799	1,864	1,940	2,030	2,138	2,265	85,1
102,1	1,729	1,788	1,852	1,922	2,005	2,104	2,216	102,1
119,1	1,721	1,777	1,839	1,905	1,983	2,071	2,177	119,1
136,1	1,712	1,767	1,827	1,890	1,963	2,046	2,142	136,1
153,1	1,704	1,758	1,815	1,877	1,947	2,023	2,113	153,1
170,1	1,697	1,749	1,805	1,864	1,930	2,003	2,088	170,1
187,1	1,691	1,742	1,795	1,852	1,915	1,983	2,066	187,1
204,1	1,685	1,733	1,785	1,838	1,900	1,968	2,043	204,1

Tabela 111. Viscositatea *n*-butanului lichid și gazos în funcție de temperatură și de presiune, $\mu \cdot 10^6$ în poise

P, ata	10 ⁶ , μ , în poise, la temperatura					π
	37,78°C	54,44°C	71,11°C	87,78°C	104,44°C	
Vapori saturanți:						
Lichid în echilibru	83,8	93,7	103	121	148	—
cu vapori	1 470	1 232	1 024	834	—	—
1,00	78,4	82,6	86,9	91,0	94,7	0,0267
1,36	78,7	83,1	87,4	91,4	95,3	0,0363
2,72	82,1	85,3	89,1	93,3	97,5	0,0726
4,08	—	88,2	91,7	95,8	99,8	0,109
6,80	—	—	98,3	101	104	0,182
10,28	—	—	—	112	113	0,273
13,61	1 486	1 248	1 034	836	125	0,363
27,22	1 506	1 272	1 058	862	—	0,726
40,82	1 530	1 295	1 081	887	—	1,09
68,04	1 565	1 332	1 120	930	—	1,82
102,1	1 608	1 370	1 165	976	—	2,73
136,1	1 637	1 398	1 190	1 009	—	3,63

Tabela 112. Viscositatea izobutanului lichid și a celui gazos în funcție, de temperatură și de presiune, 10⁶ μ în poise

P, ata	10 ⁶ , μ în poise, la temperatura					π
	37,78°C	54,44°C	71,11°C	87,78°C	104,44°C	
In echilibru:						
Lichid	84,1	91,3	103,8	134,4	—	—
Vapori	1320	1 058	890	753	—	—
1,00	76,5	79,5	82,6	85,7	88,7	0,0274
1,36	77,5	80,2	83,1	86,6	89,8	0,0374
2,72	79,2	81,8	85,2	88,7	92,1	0,0747
4,08	82,1	84,2	87,3	91,1	95,2	0,1125
6,80	—	89,8	92,5	95,7	99,4	0,187
10,21	—	—	101	103	106	0,280
13,61	1 344	1 071	896	117	114	0,374
27,22	1 376	1 102	928	780	—	—
40,82	1 404	1 132	956	811	—	—
68,04	1 456	1 186	1 011	862	—	—
102,1	1 506	1 252	1 065	913	—	—
136,1	1 554	1 297	1 106	954	—	—

Tabela 113. Fugacitatea *n*-butanului

P, ata	Fugacitatea, în at, la temperatura: (°C)							P, ata
	21,1	37,8	54,4	71,1	87,8	104,4	121,1	
Vapori saturați	2,00	3,20	4,84	6,96	9,59	12,72	16,27	Vapori saturați
1,000	0,970 9	0,9750	0,978 4	0,980 4	0,982 5	0,984 5	0,985 9	1,000
1,361	1,308	1,315	1,321	1,325	1,329	1,332	1,334	1,361
2,041	1,921	1,938	1,951	1,962	1,970	1,977	1,982	2,041
2,722	—	2,537	2,561	2,581	2,596	2,609	2,618	2,722
3,40	—	3,112	3,150	3,182	3,207	3,226	3,242	3,40
4,08	—	—	3,720	3,767	3,803	3,832	3,854	4,08
4,76	—	—	4,270	4,334	4,384	4,424	4,454	4,76
5,44	—	—	4,799	4,884	4,952	5,004	5,044	5,44
6,12	—	—	—	5,418	5,504	5,571	5,624	6,12
6,80	—	—	—	5,934	6,043	6,126	6,191	6,80
8,51	—	—	—	—	7,326	7,46	7,57	8,51
10,21	—	—	—	—	8,519	8,72	8,87	10,21
11,91	—	—	—	—	—	9,90	10,12	11,91
13,61	—	—	—	—	—	11,00	11,30	13,61
15,31	—	—	—	—	—	12,02	12,41	15,31
17,01	2,125	3,383	5,067	7,21	9,79	12,75	13,44	17,01
18,71	—	—	—	—	—	—	14,41	18,71
20,41	—	—	—	—	—	—	15,30	20,41
34,02	2,279	3,623	5,420	7,71	10,48	14,23	17,08	34,02
51,03	2,443	3,278	5,796	8,23	11,19	14,60	18,31	51,03
68,04	2,618	4,150	6,194	8,79	11,95	15,59	19,59	68,04
85,1	2,805	4,439	6,616	9,40	12,73	16,64	20,92	85,1
102,1	3,004	4,746	7,06	10,00	13,58	17,74	22,32	102,1
119,1	3,261	5,074	7,54	10,66	14,47	18,91	23,89	119,1
136,1	3,443	5,422	8,04	11,36	15,41	20,13	25,34	136,1
153,1	3,684	5,793	8,58	12,10	16,40	21,42	26,98	153,1
170,1	3,942	6,187	9,15	12,88	17,45	22,78	28,70	170,1
187,1	4,217	6,605	9,75	13,71	18,56	24,22	30,51	187,1
204,1	4,511	7,05	10,39	14,59	19,73	25,73	32,41	204,1

Tabela 114. Fugacitatea izobutanului

P, ata	Fugacitatea în at, la temperatura: (°C)							P, ata
	21,1	37,8	54,4	71,1	87,8	104,4	121,1	
Vapori saturați	2,82	4,36	6,36	8,86	11,92	15,37	19,28	Vapori saturați
0,680	0,669	0,670	0,672	0,672	0,672	0,674	0,674	0,680
1,00	0,976	0,978	0,980	0,982	0,974	0,985	0,986	1,00
1,36	1,316	1,321	1,325	1,328	1,331	1,334	1,336	1,36
2,04	1,938	1,951	1,960	1,968	1,975	1,979	1,985	2,04
2,72	2,536	2,561	1,578	1,592	2,603	2,613	2,622	2,72
3,40	—	3,149	3,177	3,200	3,218	3,233	3,247	3,40
4,08	—	3,714	3,757	3,791	3,817	3,840	3,862	4,08
5,44	—	—	4,860	4,925	4,988	5,017	5,057	5,44
6,80	—	—	5,886	5,995	6,079	6,146	6,211	6,80
8,51	—	—	—	7,24	7,38	7,492	7,60	8,51
10,21	—	—	—	8,38	8,60	8,77	8,93	10,21
11,91	—	—	—	—	9,73	9,97	10,19	11,91
13,61	—	—	—	—	10,79	11,11	11,40	13,61
15,31	—	—	—	—	11,76	12,18	12,54	15,31
17,01	2,998	4,587	6,621	9,10	12,00	13,18	13,62	17,01
18,71	—	—	—	—	—	14,10	14,66	18,71
20,41	—	—	—	—	—	14,94	15,62	20,41
23,81	—	—	—	—	—	—	17,36	23,81
27,22	—	—	—	—	—	—	18,81	27,22
34,02	3,222	4,925	7,14	9,76	12,89	16,25	19,77	34,02
51,03	3,450	5,289	7,162	10,47	13,83	17,47	21,34	51,03
68,04	3,720	5,675	8,17	11,22	14,83	18,74	22,94	68,04
85,1	3,995	6,086	8,76	12,01	15,87	20,07	24,61	85,1
102,1	4,289	6,524	9,38	12,85	16,98	21,47	26,35	102,1
119,1	4,603	6,992	10,03	13,74	18,15	22,95	28,18	119,1
136,1	4,937	7,49	10,73	14,68	18,95	24,51	30,10	136,1
153,1	5,294	8,02	11,48	15,63	20,70	26,15	32,13	153,1
170,1	5,675	8,56	12,127	16,74	22,09	27,88	34,26	170,1
187,1	6,082	8,75	13,10	17,87	23,55	29,72	36,51	187,1
204,1	6,52	9,81	14,00	19,06	25,10	31,65	38,88	204,1

restului sistemului, sînt dați individual, în domeniul subcritic în care se deosebesc mai mult, în fig. 118 și 119, iar în domeniul temperaturilor și al presiunilor de zăcămint, în fig. 120.

— Căldura latentă de topire a butanilor este de 26,9 kcal/kg la presiunea atmosferică, la temperaturile de topire.

— Căldura latentă de vaporizare a normal-butanului este dată în tabela 115, iar aceea a izobutanului în tabela 116. Pentru intervalele 20,41 ata... 37,5° ata, în cazul n-butanului, respectiv 27,22 ata... 36,5° ata, în cazul izobutanului, în care nu se dispune de date experimentale, ea poate fi calculată cu ecuația (1) și prin metoda Kireev, indicată la IV A.a.1.a) 6) (v. și fig. 4), în funcție de datele disponibile referitoare la presiunea de vapori (tabelele 100 și 101 sau ecuațiile 164...167).

Căldura specifică sub presiune constantă, C_p , la presiunea atmosferică a n-butanului, poate fi exprimată, după precizia dorită, printr-un polinom fie de gradul II în T , fie de gradul III:

$$C_p = 4,453 + 72,27 \cdot 10^{-3} T - 222,14 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (168)$$

$$C_p = 0,112 + 92,107 \cdot 10^{-3} T - 475,34 \cdot 10^{-7} T^2 + 9,552 \cdot 10^{-9} T^3 \quad (169)$$

unde:

C_p este căldura specifică molară a n-butanului, în kcal/kmol;

T — temperatura absolută, în °K.

sau:

$$C_p = 0,0767 + 1,253 \cdot 10^{-3} T - 3,829 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (170)$$

$$C_p = 0,00193 + 1,586 \cdot 10^{-3} T - 8,19 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,164 \cdot 10^{-9} T^3 \quad (171)$$

unde:

C_p este căldura specifică a n-butanului, în kcal/kg.

Tabela 115. Căldura latentă de vaporizare a butanului normal λ , în kcal/kg

P , ata	$t^\circ\text{C}$	kcal/kg	P , ata	$t^\circ\text{C}$	kcal/kg
2,041	19,78	88,74	10,21	80,72	68,93
2,792	29,06	86,31	11,91	87,95	66,01
3,402	36,67	84,14	13,61	94,45	63,20
4,082	44,17	82,20	15,31	100,39	58,84
4,763	48,94	80,49	17,01	108,03	57,40
5,443	54,05	78,85	18,71	110,95	54,48
6,123	58,72	77,35	20,41	115,67	51,41
6,804	63,06	75,88	—	—	—
8,505	72,56	72,28	37,47	152,01	0

Pentru a obține ecuația căldurii specifice a n-butanului în kcal/m³N, se divid coeficienții ecuațiilor (170) respectiv (171) prin greutatea specifică a 1m³N de n-butan (2,592 kg/m³N).

Căldurile specifice sub presiune constantă, C_p , ale izobutanului, la presiunea atmosferică sînt date, în mod analog, de:

$$C_p = 3,332 + 75,214 \cdot 10^{-3} T - 237,34 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (172)$$

$$C_p = 1,635 + 97,917 \cdot 10^{-3} T - 527,12 \cdot 10^{-7} T^2 + 10,932 \cdot 10^{-9} T^3 \quad (173)$$

unde:

C_p este căldura specifică molară, în kcal/kmol°K. sau de:

$$C_p = 0,0574 + 1,297 \cdot 10^{-3} T - 4,09 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (174)$$

$$C_p = 0,02818 + 1,686 \cdot 10^{-3} T - 9,08 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,1884 \cdot 10^{-9} T^3 \quad (175)$$

unde:

C_p este căldura specifică a izobutanului, în kcal/kg.

Tabela 116. Căldura latentă de vaporizare a izobutanului λ în kcal/kg

P ata	$t^\circ\text{C}$	kcal/kg	P ata	$t^\circ\text{C}$	kcal/kg
2,722	17,22	80,25	13,61	81,28	59,5
3,402	24,72	78,80	15,31	87,06	56,8
4,082	31,17	77,14	17,01	92,39	54,1
4,763	36,78	75,69	18,71	97,39	51,2
5,443	41,83	74,18	20,41	102,00	48,4
6,113	46,39	72,78	22,11	106,39	45,4
6,804	51,00	71,22	23,81	110,56	42,00
8,505	59,89	69,11	25,51	114,50	38,6
10,21	67,89	65,09	27,22	118,28	34,8
11,91	75,00	62,22	—	—	—
—	—	—	36,5	133,7	0

Pentru a obține ecuațiile căldurii specifice a izobutanului, în kcal/m³N, se divid coeficienții ecuațiilor (174) și (175) prin greutatea specifică a 1m³N de izobutan (2,592 kg/m³N).

Căldurile specifice ale butanilor la presiuni înalte, C_p , în funcție de temperatură și de presiune, se pot deduce ca valori medii ale derivatei parțiale a entalpiei, aproximativ egale cu $\left(\frac{\Delta H}{\Delta T}\right)_p$.

— Entalpia n-butanului în gama temperaturilor și a presiunilor de zăcămint este dată în tabela 117, iar aceea a izobutanului, în tabela 118.

Entalpia n-butanului de-a lungul curbei de saturație este dată în tabela 119, iar aceea a izobutanului în aceleași condiții, în tabela 120.

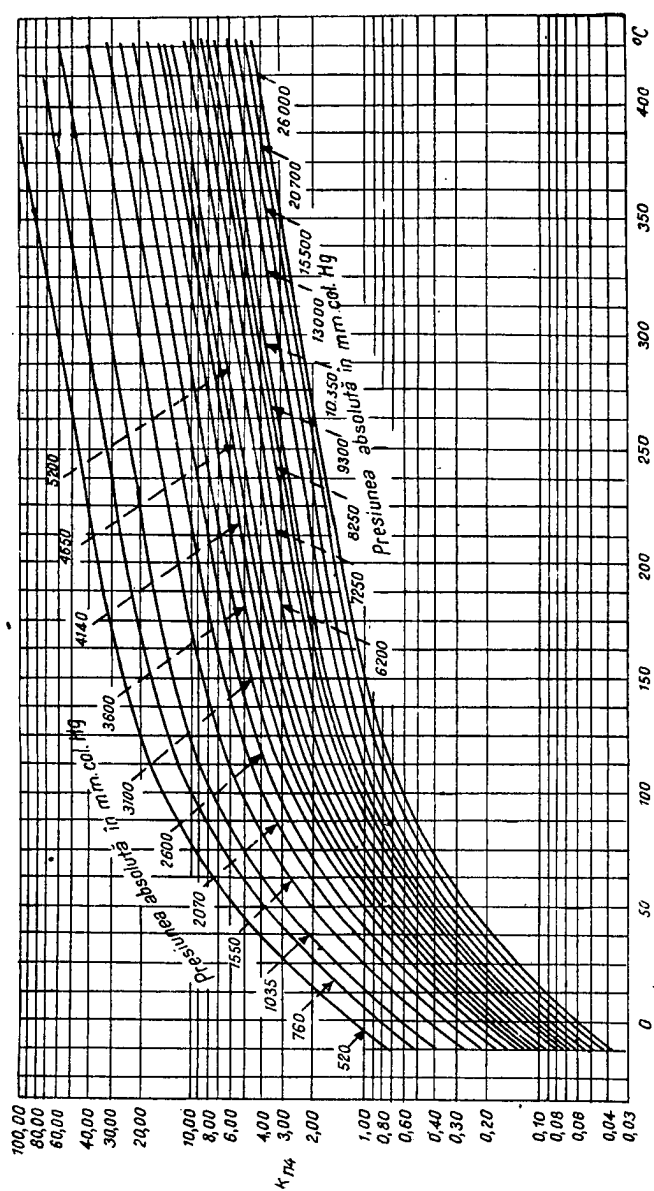


Fig. 118. Valorile coeficienților de echilibru ai n-butanului în funcție de presiune și de temperatură. Date aproximative acoperind un domeniu larg de (P, T) dar făcând abstracție de compoziția restului sistemului.

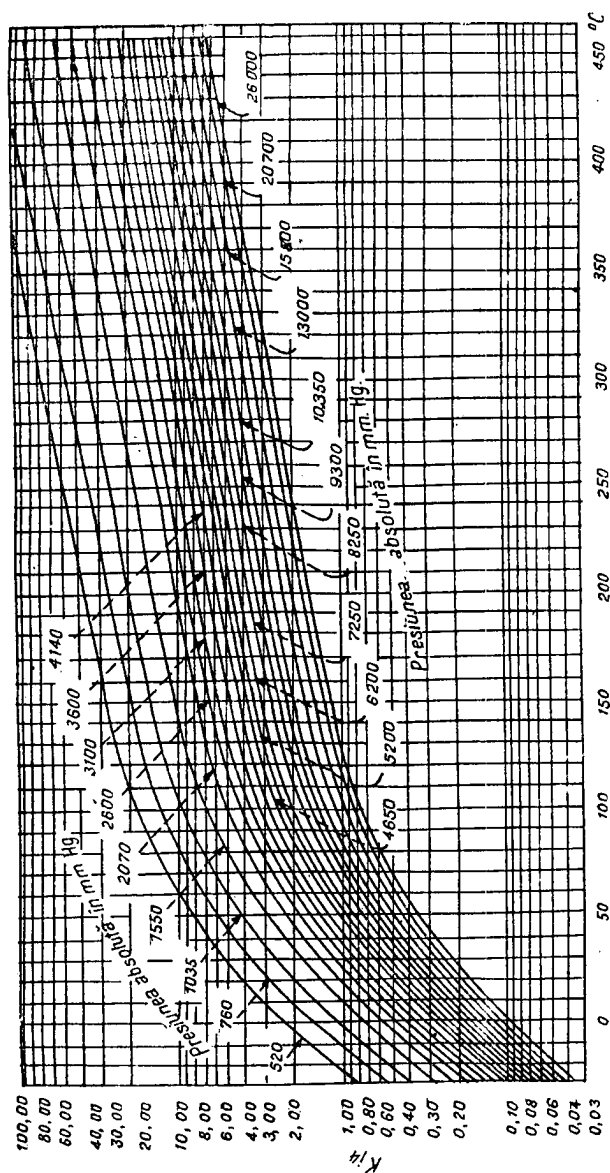


Fig. 119. Valorile coeficienților de echilibru ai isobutanului, în funcție de presiune și de temperatură. Date aproximative acoperind un domeniu larg de (P, T), dar făcând abstracție de compoziția restului sistemului.

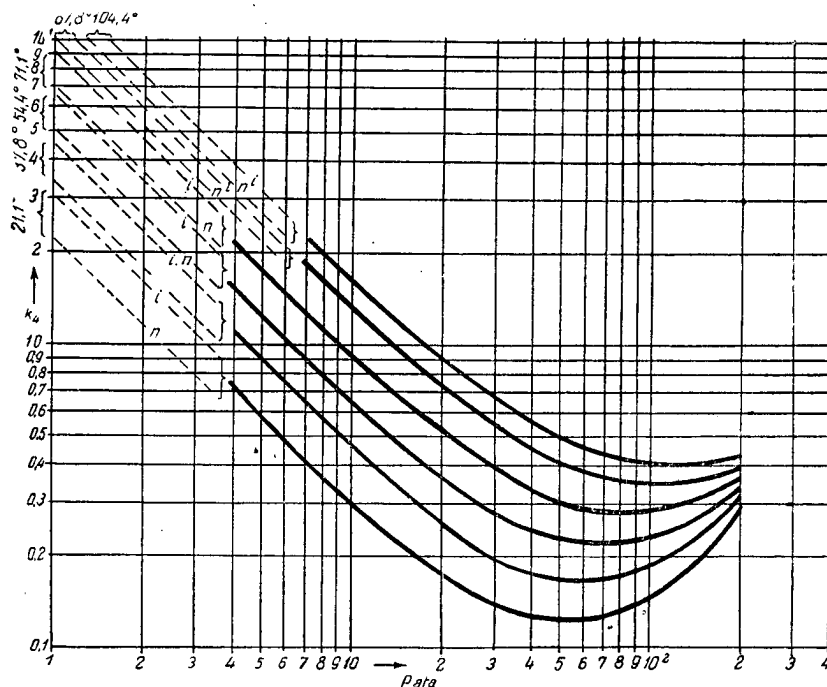


Fig. 120. Valorile coeficienților de echilibru al butanilor, în gama prestunilor și a temperaturilor, de zăcămint, pentru un țigii cu greutate moleculară medie.

Entropia normal-butanului lichid sau a celui gazos în gama temperaturilor și a presiunilor de zăcămint este dată în tabela 121.

Entropia izobutanului lichid sau a celui gazos în gama temperaturilor și a presiunilor de zăcămint este dată în tabela 122.

— Entropia *n*-butanului în faza lichidă și în cea gazoasă, în echilibru, de-a lungul curbei de saturație, este dată în tabela 123, luându-se drept $S = 0$ = entropia fazei lichide la 15,55°C, în contact cu vaporii ei saturați.

— Entropia izobutanului în faza gazoasă și în cea lichidă, în echilibru, de-a lungul curbei de saturație, este dată în tabela 124, la construcția căreia s-a luat: $0 = S_{15,55^\circ}$, lic.

Coeficienții de răcire prin detentă adiabatică a vaporilor nesaturați de *n*-butan sînt dați în tabela 125.

— Coeficienții de răcire prin detentă adiabatică a vaporilor de izobutan sînt dați în tabela 126.

b) Alcanii superiori (C_nH_{2n+2} ; $n \geq 5$) prezintă un număr de izomeri, care cresc progresiv cu n , astfel încît, pe de o parte ei participă la formarea sistemelor de hidrocarburi din zăcămint în fracțiune foarte redusă și au proprietăți care se deosebesc relativ puțin de la izomer la izomer, iar pe de altă parte, din cauza dificultăților de izolare în stare de puritate suficientă, pentru a li se putea determina proprietățile fizice individuale în mod reprezentativ, ei sînt studiați mai puțin amănunțit.

nunțit. Din aceste cauze, cum și pentru a evita un volum mare de calcule, atât în problemele de fizică zăcămintelor, cât și în problemele de extracția hidrocarburilor, se evită examinarea individuală a acestor componenți, recurgându-se la diferite soluții aproximative (tipuri fictive reprezentând toți izomerii aceluiași termen sau deseori chiar tipuri grupând mai mulți termeni ai seriei, inclusiv toți izomerii lor, pe criteriul greutateii moleculare medii sau, mai ales în problemele de prelucrare, al temperaturii medii de fierbere). Soluțiile aproximative care folosesc parametrul de volum molar comparat (paracor) sînt, în general, soluții extreme, utilizate în caz de lipsă de date experimentale, care trebuie evitate în măsura posibilităților.

Din aceste motive, proprietățile lor fizice sînt date sumar, grupate. Pentru detalii, a se vedea Cap. IV B.d.2 și vol. III.

— Punctele caracteristice ale legii de stare: Punctele de fierbere sînt puncte particulare ($P = 1$ ata) ale curbei $P = f(t)$ (v. fig. 120).

Punctele critice. Temperatura critică a alcanilor poate fi determinată cu aproximație de $\pm 2\%$ cu relația

$$T_c = 2,95 (T_f)^{0,882} \quad (176)$$

in care:

T_c este temperatura critică, în °K;

T_f — temperatura de fierbere la presiunea atmosferică, în °K.

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE SISTEMELOR FLUIDE

315

Tabela 117. Entalpia n-butanului în faza lichidă și în cea gazoasă, în gama temperaturilor de zăcămint

P, ata	H, în k cal/kg, pentru temperatura:						
	21,11°	37,78°	54,55°C	71,11°	87,78°	104,44°	121,11°C
Vapori saturați în echilibru cu lichidul	91,50	96,80	101,99	107,22	112,29	116,39	119,05
(λ)	3,15	12,96	23,34	34,37	—	—	—
	(88,35)	(83,84)	(78,65)	(72,86)	—	—	—
1,000	92,79	99,18	105,80	112,63	119,66	126,92	134,38
1,361	92,45	98,91	105,50	112,42	119,48	126,76	134,26
2,041	91,65	98,34	105,07	111,98	119,12	126,45	133,98
2,722	—	97,68	104,54	111,54	118,73	126,13	133,70
3,402	—	96,95	103,96	111,07	118,34	125,79	133,42
4,082	—	—	103,36	110,57	117,91	125,43	133,12
4,763	—	—	102,71	110,06	117,47	125,07	132,81
5,443	—	—	102,04	109,53	117,03	124,69	132,48
6,123	—	—	—	108,98	116,57	124,28	132,14
6,804	—	—	—	108,43	116,09	123,86	131,78
8,505	—	—	—	—	114,86	122,75	130,84
10,21	—	—	—	—	113,57	121,55	129,83
11,91	—	—	—	—	—	120,27	128,71
13,61	—	—	—	—	—	118,92	127,49
15,31	—	—	—	—	—	117,48	126,17
17,01	3,38	13,13	23,44	34,37	45,99	58,39	124,74
18,71	—	—	—	—	—	—	123,18
20,41	—	—	—	—	—	—	121,46
34,02	3,65	13,38	23,62	34,41	45,79	57,78	70,43
51,03	3,95	13,64	23,82	34,50	45,67	57,37	69,60
68,04	4,26	13,92	24,05	34,62	45,63	57,09	69,01
85,05	4,58	14,22	24,29	34,77	45,16	56,91	68,58
102,1	4,92	14,53	24,55	34,95	45,70	56,80	68,26
119,1	5,27	14,86	24,83	35,15	45,80	56,74	68,01
136,1	5,64	15,20	25,12	35,38	45,93	56,73	67,83
153,1	6,01	15,54	25,43	35,63	46,09	56,77	67,70
170,1	6,39	15,90	25,75	35,89	46,27	56,84	67,63
187,1	6,78	16,26	26,07	36,16	46,47	56,94	67,55
204,1	7,17	16,63	26,40	36,45	46,69	57,07	67,59

Tabela 118. Entalpia izobutanului în faza lichidă și în cea gazoasă, în gama temperaturilor de zăcămint

P, ata	21,11	37,78	54,44	71,11	87,78	104,44	121,11°C
Vapori saturați lichid	82,77 3,10	88,09 12,80	93,12 23,10	97,86 34,05	102,3 45,77	105,1 58,5	104,4 72,5
0,680	84,85	91,41	98,08	104,99	112,09	119,40	126,92
1,000	84,65	91,23	97,95	104,87	111,99	119,32	126,86
1,361	84,40	91,00	97,77	104,73	111,87	119,23	126,78
2,722	83,18	90,08	97,01	104,09	111,34	118,74	126,42
4,082	—	88,88	96,09	103,31	110,67	118,18	125,96
5,443	—	—	94,99	102,42	109,90	117,53	125,41
6,804	—	—	93,77	101,50	109,05	116,79	124,78
8,505	—	—	—	100,19	107,85	115,76	123,90
10,21	—	—	—	98,83	106,54	114,62	123,93
11,91	—	—	—	—	105,25	113,38	121,85
13,61	—	—	—	—	103,9	112,06	120,70
15,31	—	—	—	—	102,5	110,63	119,46
17,01	3,21	12,91	23,12	33,97	45,72	109,12	118,15
18,71	—	—	—	—	—	107,50	116,8
20,41	—	—	—	—	—	105,0	115,3
23,81	—	—	—	—	—	—	111,9
27,22	—	—	—	—	—	—	107,0
34,02	3,42	13,10	23,21	33,83	45,20	57,62	71,83
51,03	3,66	13,33	23,35	33,78	44,89	56,83	70,39
68,04	3,92	13,57	23,51	33,80	44,71	56,42	69,45
85,05	4,18	13,82	23,72	33,89	44,64	56,13	68,84
102,1	4,47	14,09	23,94	34,03	44,63	55,97	68,44
119,1	4,76	14,37	24,18	34,19	44,69	55,88	68,17
136,1	5,07	14,67	24,44	34,38	44,78	55,87	67,99
153,1	5,38	14,97	24,71	34,58	44,91	55,89	67,88
170,1	5,70	15,28	24,99	34,81	45,07	55,96	67,83
187,1	6,03	15,60	25,28	35,05	45,26	56,06	67,82
204,1	6,37	15,93	25,58	35,32	45,46	56,19	67,86
λ	79,67	74,29	70,02	63,81	56,5	46,6	31,9

Tabela 119. Entalpia *n*-butanului lichid în contact cu vaporii saturați în gama temperaturilor de zăcămint
($H_{15,550} = 0$ pentru lichid)

P , ata	$t^\circ\text{C}$	H_{vap}	H_{lic}	P , ata	$t^\circ\text{C}$	H_{vap}	H_{lic}
2,041	19,78	91,07	2,33	8,505	72,56	107,68	35,40
2,722	29,06	93,98	7,67	10,21	80,72	110,22	41,29
3,402	26,67	96,42	12,28	11,91	87,95	112,33	46,23
4,082	43,17	98,48	16,28	13,61	94,45	114,08	50,88
4,763	49,84	100,30	19,81	15,31	100,39	115,52	55,24
5,443	54,05	101,91	23,06	17,01	105,83	116,68	59,28
6,123	58,72	103,36	26,01	18,71	110,95	117,63	63,15
6,804	63,06	104,71	28,83	20,41	115,67	118,35	66,89

Tabela 120. Entalpia izobutanului lichid în contact cu vaporii saturați în gama temperaturilor de zăcămint
($H_{15,550} = 0$ pentru lichid)

P , ata	$t^\circ\text{C}$	H_{vap}	H_{lic}	P , ata	$t^\circ\text{C}$	H_{vap}	H_{lic}
2,722	17,22	81,16	0,91	13,61	81,28	100,6	41,09
3,402	24,17	83,97	5,17	15,31	87,06	102,1	45,25
4,082	31,17	86,04	8,90	17,01	92,39	103,3	49,19
4,763	36,78	87,89	12,20	18,71	97,39	104,1	52,94
5,443	41,83	89,37	15,19	20,41	102,00	104,9	56,5
6,113	46,39	90,77	17,99	22,11	106,39	105,4	60,0
6,804	51,00	92,10	20,88	23,81	110,56	105,4	63,4
8,505	59,89	94,72	26,61	25,51	114,50	105,3	66,7
10,21	67,89	96,97	31,88	27,22	118,28	104,9	70,1
11,91	75,00	98,93	26,71				

Tabela 121. Entropia *n*-butanului în condițiile de temperatură și presiune din zăcăminte*)

P ata	$S - S_{15^\circ}$ kcal/kg $^\circ\text{C}$, la temperatura							P ata
	21,11 $^\circ\text{C}$	37,78 $^\circ\text{C}$	54,44 $^\circ\text{C}$	71,11 $^\circ\text{C}$	87,78 $^\circ\text{C}$	104,44 $^\circ\text{C}$	121,11 $^\circ\text{C}$	
Vapori saturați	0,3109	0,3125	0,3152	0,3192	0,3237	0,3266	0,3267	Vapori saturați
Lichid	0,01075	0,04295	0,07518	0,1076	0,1403	0,1731	0,2055	Lichid
1,000	0,3396	0,3607	0,3814	0,4017	0,4217	0,4414	0,4607	1,000
1,361	0,3279	0,3492	0,3701	0,3905	0,4105	0,4332	0,4496	1,361
2,041	0,3125	0,3345	0,3556	0,3762	0,3964	0,4163	0,4358	2,041
2,722	—	0,3232	0,3447	0,3655	0,3859	0,4060	0,4256	2,722
3,402	—	0,3139	0,3359	0,3570	0,3776	0,3978	0,4175	3,402
4,082	—	—	0,3283	0,3497	0,3706	0,3910	0,4109	4,082
4,763	—	—	0,3215	0,3453	0,3647	0,3751	0,4051	4,763
5,443	—	—	0,3157	0,3376	0,3590	0,3799	0,4001	5,443
6,123	—	—	—	0,3323	0,3541	0,3752	0,3955	6,123
6,804	—	—	—	0,3274	0,3494	0,3708	0,3915	6,804
8,905	—	—	—	—	0,3390	0,3611	0,3819	8,905
10,21	—	—	—	—	0,3305	0,3525	0,3740	10,21
11,91	—	—	—	—	—	0,3445	0,3669	11,91
13,61	—	—	—	—	—	0,3370	0,3600	13,61
15,31	—	—	—	—	—	0,3306	0,3533	15,31
17,01	0,00942	0,04164	0,073 92	0,106 5	0,1394	0,1730	0,2068	17,01
18,71	—	—	—	—	—	—	0,3405	18,71
20,41	—	—	—	—	—	—	0,3343	20,41
34,02	0,00797	0,04009	0,07216	0,1043	0,1366	0,1690	0,2018	34,02
51,03	0,00660	0,03861	0,07049	0,1023	0,1340	0,1657	0,1975	51,03
68,04	0,00529	0,03721	0,06091	0,1004	0,1317	0,1627	0,1936	68,04
85,05	0,00405	0,03586	0,06741	0,0987	0,1295	0,1600	0,1902	85,05
102,1	0,00286	0,03453	0,06597	0,0970	0,1275	0,1575	0,1872	102,1
119,1	0,00168	0,03336	0,06459	0,0954	0,1256	0,1552	0,1844	119,1
136,1	0,00058	0,03218	0,06327	0,0939	0,1238	0,1530	0,1818	136,1
153,1	—0,00047	0,03104	0,06200	0,0924	0,1221	0,1510	0,1793	153,1
170,1	—0,00148	0,02994	0,06078	0,0911	0,1205	0,1491	0,1770	170,1
187,1	—0,00247	0,02886	0,05959	0,0897	0,1199	0,1472	0,1748	187,1
204,1	—0,00343	0,02782	0,05844	0,0884	0,1175	0,1454	0,1728	204,1

*) Entropia nulă este luată cea a lichidului în echilibru cu vaporii saturați la $t^\circ = 15,55^\circ\text{C}$.

Tabela 122. Entropia izobutanului în condițiile de temperaturi și presiune din zăcăminte*)

P, ata	S - S _{15°} , kcal/kg, °C, la empera ura							P, ata
	21,11°C	37,78°C	54,44°C	71,11°C	87,78°C	104,44°C	121,11°C	
Vapori saturanți	0,2182	0,2844	0,2878	0,2915	0,2954	0,2959	0,2882	Vapori saturanți
Lichid	0,01040	0,04217	0,07461	0,1061	0,1387	0,1721	0,2073	Lichid
0,680	0,3376	0,3591	0,3801	0,4006	0,4208	0,4405	0,4600	0,680
1,000	0,3239	0,3457	0,3667	0,3873	0,4075	0,4274	0,4469	1,000
1,361	0,3129	0,3347	0,3559	0,3766	0,3969	0,4160	0,4364	1,361
2,722	0,2863	0,3091	0,3309	0,3519	0,3725	0,3926	0,4124	2,722
4,082	—	0,2946	0,3152	0,3367	0,3576	0,3700	0,3900	4,082
5,445	—	—	0,3831	0,3252	0,3464	0,3671	0,3875	5,445
6,804	—	—	0,2927	0,3155	0,3372	0,3533	0,3789	6,804
8,505	—	—	—	0,3649	0,3273	0,3488	0,3698	8,505
10,21	—	—	—	0,2954	0,3184	0,3404	0,3618	10,21
11,91	—	—	—	—	0,3104	0,3327	0,3546	11,91
13,61	—	—	—	—	0,3031	0,3255	0,3478	13,61
15,31	—	—	—	—	0,2964	0,3186	0,3414	15,31
17,01	0,008 90	0,040 79	0,072 75	0,105 0	0,1384	0,1719	0,2053	17,01
18,71	—	—	—	—	—	0,3054	0,3293	18,71
20,41	—	—	—	—	—	0,3000	0,3233	20,41
23,81	—	—	—	—	—	—	0,3114	23,81
27,22	—	—	—	—	—	—	0,2964	27,22
34,02	0,00718	0,03896	0,07069	0,1022	0,1344	0,1680	0,2048	34,02
51,05	0,00554	0,03723	0,06962	0,09997	0,1311	0,1636	0,1985	51,05
68,04	0,00397	0,03569	0,06677	0,0975	0,1283	0,1600	0,1936	68,04
85,05	0,00248	0,03403	0,06405	0,0953	0,1257	0,1569	0,1897	85,05
102,11	0,00104	0,03252	0,06338	0,0934	0,1234	0,1541	0,1863	102,11
119,1	—0,00036	0,03106	0,06179	0,0915	0,1212	0,1516	0,1834	119,1
136,1	—0,00171	0,02964	0,06027	0,0890	0,1193	0,1493	0,1817	136,1
153,1	—0,00302	0,02827	0,05880	0,0882	0,1174	0,1472	0,1781	153,1
170,1	—0,00429	0,02695	0,05738	0,0866	0,1156	0,1452	0,1758	170,1
187,1	—0,00551	0,02567	0,05600	0,0851	0,1140	0,1433	0,1736	187,1
204,1	—0,00443	0,02443	0,05467	0,0836	0,1124	0,1416	0,1716	204,1

*) Entropia nulă este luată cea a lichidului în echilibru cu vaporii saturanți la $t^{\circ} = 15,55^{\circ}\text{C}$.Tabela 123. Entropia n-butanului în domeniul bifazic, cu $S_{\text{lic}} 15,65^{\circ} = 0$, în kcal/kg °C

P, ata	$t^{\circ}\text{C}$	S_{vap}	S_{lic}	P, ata	$t^{\circ}\text{C}$	S_{vap}	S_{lic}
2,041	19,78	0,3109	0,0157	8,508	72,56	0,3199	0,1105
2,722	29,06	0,3117	0,0286	10,21	80,72	0,3219	0,1267
3,402	36,67	0,3125	0,0407	11,91	87,95	0,3238	0,1409
4,082	43,17	0,3133	0,0527	13,61	94,45	0,3253	0,1535
4,763	48,94	0,3143	0,0639	15,31	100,39	0,3262	0,1667
5,443	54,05	0,3153	0,0741	17,01	105,83	0,3268	0,1755
6,124	58,72	0,3163	0,0834	18,71	110,95	0,3271	0,1857
6,804	63,06	0,3173	0,0919	20,41	115,07	0,3272	0,1951

Tabela 124. Entropia izobutanului în domeniul bifazic, $S_{15,55^{\circ} \text{ lic.}} = 0$

P, ata	$t^{\circ}\text{C}$	$S_{\text{vap.}}$	$S_{\text{lic.}}$	P, ata	$t^{\circ}\text{C}$	$S_{\text{vap.}}$	$S_{\text{lic.}}$
2,722	17,22	0,2804	0,0032	13,61	81,28	0,2939	0,1259
3,402	24,72	0,2819	0,0173	15,31	87,06	0,2952	0,1373
4,082	31,17	0,2832	0,0296	17,01	92,39	0,2958	0,1478
4,763	36,78	0,2842	0,0403	18,71	97,39	0,2960	0,1578
5,443	41,83	0,2853	0,0499	20,41	102,00	0,2960	0,1672
6,113	46,39	0,2863	0,0586	22,11	106,39	0,2955	0,1761
6,804	51,00	0,2872	0,0674	23,81	110,56	0,2942	0,1847
8,505	59,89	0,2890	0,0844	25,51	114,50	0,2921	0,1929
10,21	67,89	0,2907	0,0998	27,22	118,28	0,2898	0,2010

— Presiunea critică a alcanilor poate fi determinată cu relația

$$P_c = 48,2 - 28,26 \log^{1,219} (n - 1) \quad (177)$$

în care n este numărul de atomi de carbon din moleculă, ecuația este valabilă pentru $n \geq 2$, cu o eroare de $\sim 0,6$ at în cazul butanului, respectiv cu o eroare mai mică decât

Tabela 125. Coeficienții de răcire prin detentă adiabatică a vaporilor nesaturați de n -butan, α , în $^{\circ}\text{C/at.}$, în funcție de temperatură și de presiune

P , ata	21,1 $^{\circ}\text{C}$	37,8 $^{\circ}\text{C}$	54,4 $^{\circ}\text{C}$	71,1 $^{\circ}\text{C}$	87,8 $^{\circ}\text{C}$	104,4 $^{\circ}\text{C}$
Vapori saturați *)	(3,06)	(2,72)	(2,44)	(2,21)	(2,04)	(1,87)
1,000	2,37	1,92	1,63	1,39	1,17	0,96
1,361	2,58	2,03	1,70	1,45	1,20	0,98
2,72	—	2,46	1,97	1,62	1,33	1,07
4,08	—	—	2,21	1,78	1,45	1,15
5,44	—	—	2,41	1,93	1,56	1,23
6,80	—	—	—	2,06	1,66	1,31
8,51	—	—	—	—	1,78	1,40
10,21	—	—	—	—	1,90	1,49
11,91	—	—	—	—	2,02	1,59
13,61	—	—	—	—	—	1,60
15,31	—	—	—	—	—	1,79

*) Valoarea limită, pentru o detentă infinit mică, $\left(\frac{\partial T}{\partial T}\right)_H$

0,2 at pentru n cuprins între 8—15 (Ecuația nu este valabilă pentru $n = 1$).

— Volumul specific critic molar este calculat de obicei cu relația

$$V_c = (0,377 \bar{P} + 11)^{1,25} \quad (178)$$

în care P este paracorul *) dat de relația

$$P = \frac{M\sigma^{0,25}}{\rho_l - \rho_g},$$

în care:

M este greutatea moleculară;

σ — tensiunea superficială a alcanului respectiv la contactul fazei lichide cu vaporii ei saturați în amestec cu aerul, la 760 mm col. Hg și la 0°C , în dyn/cm;

ρ_l și ρ_g — densitatea fazei lichide, respectiv a celei gazoase, în aceleași condiții, cu o eroare care rămâne, în general, mai mică decât 5%.

Cu ajutorul paracorului se mai poate determina, de asemenea presiunea critică, P_c , cînd se cunosc T_c și V_c , folosind relația

$$P_c = \frac{20,8 T_c}{V_c - 8} \quad (179)$$

în care:

V_c este volumul specific molar critic, în cm^3/mol ;

T_c — temperatura critică, în $^{\circ}\text{K}$.

— Presiunea de vapori $P = f(t)$ a alcanilor se poate determina folosind diagrama reprezentată în fig. 121.

[A se vedea și metoda de determinare a presiunilor de vapori cu relația (1)].

Legile de stare ale fiecărei hidrocarburi (în special ale alcanilor) prezintă coeficienți numerici diferiți și valabilitate pe domenii limitate. Chiar admițînd aditivitatea coeficienților \bar{V}_a și b din ecuația (16), deducerea lor pe această cale, pentru sistemele multicomponente, este laborioasă și prezintă exactitate disproporționat de redusă față de volumul de calcul. Din această cauză, se preferă, în general, determinarea pe cale experimentală,

Tabela 126. Coeficienții de răcire prin detentă adiabatică a vaporilor nesaturați de izobutan, $\alpha = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H$ în $^{\circ}\text{C/at.}$

P , ata	Pentru temperatura						
	21,1 $^{\circ}\text{C}$	37,8 $^{\circ}\text{C}$	54,4 $^{\circ}\text{C}$	71,1 $^{\circ}\text{C}$	87,8 $^{\circ}\text{C}$	104,4 $^{\circ}\text{C}$	121,1 $^{\circ}\text{C}$
Vapori saturați **)	(2,79)	(2,49)	(2,24)	(2,04)	(1,90)	(1,81)	(1,76)
0,00	1,22	1,07	0,91	0,76	0,60	0,45	0,29
1,00	1,70	1,38	1,13	0,93	0,76	0,60	0,44
1,36	1,88	1,48	1,21	0,99	0,81	0,64	0,49
2,72	2,60	1,88	1,47	1,21	1,00	0,82	0,65
4,08	—	2,27	1,72	1,41	1,17	0,97	0,79
5,44	—	—	1,95	1,58	1,31	1,10	0,91
6,80	—	—	2,16	1,73	1,43	1,21	1,00
8,51	—	—	—	1,87	1,56	1,32	1,11
10,21	—	—	—	1,90	1,66	1,42	1,20
11,92	—	—	—	—	1,76	1,50	1,28
13,61	—	—	—	—	1,83	1,57	1,34
15,31	—	—	—	—	1,90	1,64	1,41
17,01	—	—	—	—	—	1,69	1,47
20,41	—	—	—	—	—	1,79	1,57
23,81	—	—	—	—	—	—	1,66
27,22	—	—	—	—	—	—	1,73

*) Pentru determinarea grafică v. Manualul chimistului. AGIR, fig. 95 pag. 2112.

**) Valoarea limită.

în cazurile particulare în care legea este necesară. Pentru valorile coeficienților a și b , a se vedea și vol. III.

— Viscositatea alcanilor superiori în starea lichidă (v. și vol. III). În cazul sistemelor multi-

măsură aditive, dar numai în condiții depărate de cele critice ale componentelor importanți din punct de vedere cantitativ, sînt folosite individual, numai în mod excepțional, în problemele de fizica zăcămintului, de

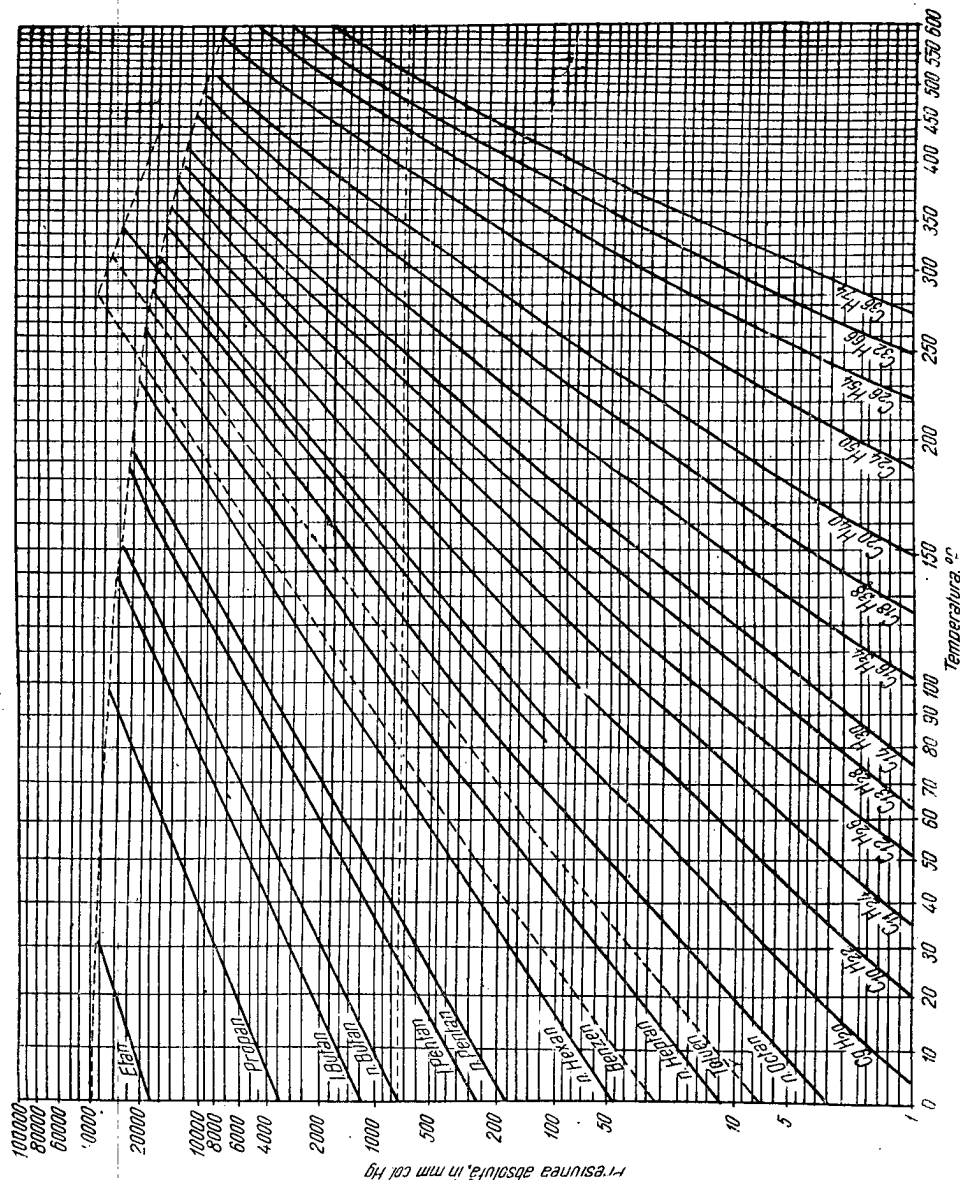


Fig. 121. Presiunea de vapori a alcanilor, în funcție de temperatură. Curbele continui sînt curbele individuale de presiune de vapori, curbele întrerupte — locul geometric al punctelor critice; I — alcani; II — aromate.

componente, se folosește determinarea experimentală, viscozitatea fiind prin excelență proprietatea fizică a lichidelor, căreia legea aditivității nu i se poate aplica.

— Proprietățile termice, călduri latente și specifice, entalpie, entropie etc., în oarecare

extracția hidrocarburilor din zăcămint sau de transport-înmagazinare (v. vol. III).

c) Hidrocarburi din alte serii. În sistemele naturale de hidrocarburi se găsesc, afară de alcani, în cantități industriale, numai următoarele:

Cicloalcanii (C_nH_{2n}), serie ai cărei primi termeni, ciclopropanul și ciclobutanul, sînt cantitativ foarte puțin răspîndiți. Termenii de la $n \geq 5$ sînt întîlniți în zăcămintele cu țițeiuri naftenice, în concentrații totale de cîteva zeci de procente. Din cauza frecvenței lor reduse, a numărului mare de izomeri și de omologi și din cauza prezenței lor aproape exclusiv în faza lichidă a zăcămintului, ei nu sînt studiați izolat, ci grupat (pentru proprietăți, v. vol. III).

Hidrocarburile aromatice (benzenice, C_nH_{2n-6} ; $n \geq 6$) sînt, din aceleași cauze, rar studiate individual (pentru proprietățile lor, a se vedea vol. III).

Celelalte serii, alchenele, alcadienele, alcatrienle, alchinele, terpenele, naftalelenele, se întîlnesc în sistemele naturale de hidrocarburi numai în concentrații neglijabile din punctul de vedere al comportării lor în zăcămint și în cursul procesului de extracție din zăcămint (pentru proprietăți individuale, a se vedea vol. III).

d) Anhidrida carbonică saturează, uneori în proporție sensibilă, unele zăcămint de hidrocarburi și, din cauza proprietăților ei deosebite, influențează procesele de golire a zăcămintului, în special în cazul unora dintre metodele de recuperare secundară. Este folosită în starea solidă ca agent frigorigen pentru conservarea carotelor.

Greutatea moleculară este de 44,01; densitatea față de aer, în starea normală: 1,5290.

Puncte caracteristice ale ecuației de stare: Punctul critic: $31,0^\circ\text{C}$ și $72,7$ at. Punctul triplu: $-183,5^\circ\text{C}$ și $5,11$ at. (Observație. La presiunea atmosferică, CO_2 nu poate exista decît starea gazoasă dacă temperatura este mai mare decît $-56,6^\circ\text{C}$, respectiv solidă dacă temperatura este mai mică).

Proprietățile ei fizice mai importante sînt date în tabela 127.

Dintre proprietățile fizice particulare trebuie menționate:

— conductibilitatea termică foarte redusă în starea solidă:

$$\alpha = \frac{236,5}{T^{1,216}}$$

unde α este conductibilitatea termică, în $\text{kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$, ceea ce o face deosebit de economică ca agent frigorigen, putîndu-se conserva în starea solidă cu toată diferența mare de temperatură față de mediul ambiant;

— solubilitatea remarcabilă atît în apă, cît și în țițeiuri, circa $0,9 \text{ m}^3\text{N/m}^3$ at la presiunile joase, în apă, și $0,8-1,2 \text{ m}^3\text{N/m}^3$ at, în țițeiuri (solubilitatea ei este mai mare chiar decît aceea a metanului).

e) Hidrogenul sulfurat se găsește numai ca impuritate în unele zăcămint de hidrocarburi (deobicei, sulful nu este legat sub această formă, ci ca mercaptani sau ca tiofeni) și produce dificultăți de exploatare din cauza corozivității lui față de metale și a capacității lui de a forma criohidrați.

Greutatea moleculară: $34,08$; greutatea specifică: $1,5392 \text{ kg/m}^3\text{N}$; densitatea față de aer: $1,1906$; punct de fierbere la presiunea atmosferică: $t = -60,4^\circ\text{C}$; punct de topire la presiunea atmosferică: $t_i = -85,6$; punctul critic: $t_c = +104,4^\circ\text{C}$; $P_c = 89,0$ at; căldura specifică C_p la 0°C și la 760 mm col. Hg; $C_p = 0,264 \text{ kcal/kg}$; exponentul adiabatic: $C_p/C_v = 1,30$ la 0°C .

2. Proprietățile sistemelor multicomponente de hidrocarburi. Din cauza complexității acestor sisteme și a variației proprietăților lor în funcție de condițiile de zăcămint, nu sînt cercetate decît cele necesare din punct de vedere tehnic sau economico-tehnic.

a) Sisteme constituite exclusiv din hidrocarburi.

— Greutatea moleculară a acestora variază de la aceea a metanului ($16,032$) pînă la peste 300 , unii dintre componenți depășind valoarea 400 (v. vol. III).

Determinarea greutății moleculare fiind o operație care cere operatori calificați și apa-

Tabela 127. Proprietățile fizice principale ale anhidridei carbonice

Temperatura, $^\circ\text{C}$	Presiunea, kg/cm^2	Volum specific, l/kg			Greutatea specifică, kg/m^3			Entalpia în kcal/kg			Entropia $\text{kcal/}^\circ\text{C}$			Căldura latentă de evaporare respectiv de sublimare
		Solid γ''	Lichid γ'	Vapori γ	Solid γ''	Lichid γ'	Vapori γ	Solid H''	Lichid H'	Vapori H	Solid S''	Lichid S'	Vapori S	
+ 31	73,34	—	2,156	2,156	—	463,9	463,9	—	133,5	133,5	—	1,110	1,110	0
+ 20	58,46	—	1,298	5,258	—	770,7	190,2	—	114	151,1	—	1,047	1,173	37,10
0	35,54	—	1,081	10,383	—	924,8	96,3	—	110	156,1	—	1	1,205	56,13
- 20	20,06	—	0,971	19,466	—	1 029,9	51,4	—	88,9	156,7	—	0,959	1,227	67,79
- 56,6	5,28	0,661	0,849	72,22	1 512,4	1 178	13,8	25,21	71,97	155,1	0,672	0,888	1,272	83,12 evap. 129,8 subil.
- 70	2,02	0,647	—	185,39	1 541,1	—	5,39	19,59	—	154,5	0,648	—	1,310	134,93
- 78,9	1,00	0,640	—	365,12	1 564	—	2,74	16,73	—	153,6	0,631	—	1,336	136,89
- 100	0,142	0,627	—	233,6	1 595,2	—	0,428	10,88	—	150,65	0,599	—	1,407	139,77

ratură de înaltă precizie, în practică, pentru țiteiuri, se preferă folosirea în locul ei, a unei mărimi combinate, numită «factorul de caracterizare» K , dat de formula

$$K = \frac{1,216 \sqrt[3]{T}}{d} \quad (180)$$

în care:

K este factorul de caracterizare;
 T — temperatura medie molară de fierbere;

d — densitatea $d_{15,56}^{15,56}$.

Valorile ridicate ale lui K (de ordinul 12—12,5) sînt caracteristice alcanilor, iar cele reduse (10,5—10), țiteiurilor cu conținut important de aromate.

Fără a prezenta o creștere direct legată de aceea a greutății moleculare, el este mai caracteristic decît aceasta și din această cauză este folosit în multe formule practice de determinare globală a proprietăților țiteiului, îndeosebi la determinarea indirectă a proprietăților termice (v. vol. III).

— Greutatea specifică, în condițiile de suprafață standard, este de 0,72—2,6 kg/m³N pentru faza gazoasă separată în aceste condiții (valorile apropiate de limita maximă indicată nu sînt atinse decît de gazele separate în ultima treaptă de presiune, în cazul separării în trepte) și aproximativ 0,700—0,980 kg/dm³ (v. vol. III), pentru faza lichidă.

Afară de măsurarea la + 20°C *) obișnuită, în țările de limbă anglo-saxonă se obișnuiește măsurarea la + 15,56°C, iar exprimarea se face în grade API, provenite din scara Baumé.

Pentru transformare, se folosește relația

$$d_{15,56}^{15,56} = \frac{141,5}{131,5 + ^\circ\text{API}} \quad (181)$$

în care:

$d_{15,56}^{15,56}$ este densitatea relativă a produsului de cercetat în raport cu apa distilată, volumele de referință fiind ambele măsurate la + 15,56°C;

$^\circ\text{API}$ — cifra care exprimă greutatea specifică în grade API.

Pentru transformarea din relația (181), se poate folosi și tabela 128.

Pentru transformarea din $d_{15,56}^{15,56}$ în d_4^{20} , se folosesc corecțiile globale din tabela 129, iar pentru transformarea între alte limite de temperatură se efectuează corecția din tabela 127, care ține seama de diferența coeficienților de dilatare respectivi (țitei, apă și sticla termoreometrelor).

*) Densitatea d_4^{20} este raportul maselor a două cantități (fluid de cercetat fără de apă) de fluid care ocupă același volum: fluidul de cercetat la + 20°C, iar apa la + 4°C, considerată ca temperatura maximului de densitate.

Metodele de determinare a greutăților specifice la presiunea atmosferică sînt date în STAS 35-50.

— Legea de stare $F(P, v, T) = 0$, a sistemelor multicomponente de hidrocarburi are un caracter deosebit, după natura sistemului. La sistemele constituite în majoritate din hidrocarburi cu greutate moleculară sub ~30, se poate determina comportarea față de PvT a sistemului pe baza legii $P \cdot v = ZRT$, în care factorul de abatere Z poate fi determinat pe baza unei legi mai mult sau mai puțin generale de forma $Z = f(P_r, T_r)$, în care P_r și T_r sînt presiunile și temperaturile reduse (raporturile dintre presiunea, respectiv temperatura efectivă și presiunea, respectiv temperatura pseudocritică a sistemului, definită ca presiunea, respectiv temperatura medie ponderată cu conținutul fracțional molar, al componentelor) (v. IV A.a.1.b.).

Afară de metoda indicată în fig. 43, sînt ușor de folosit diagramele din fig. 122, 123, 124, 125 și 126 care dau, prin citire directă, fără calculul presiunilor și al temperaturilor reduse sau pseudocritice, factorii de abatere ai sistemelor de gaze «uscate» (fără un conținut în hidrocarburi mai grele, suficient pentru a provoca nașterea unei faze lichide prin răcire și prin detentă), în funcție de presiune, de temperatură și de densitatea față de aer.

Pentru sistemele care, deși în stare gazoasă în condițiile de zăcămint, prin trecerea la condițiile de presiune și de temperatură de exploatare, dau naștere unei fracțiuni lichide (condensat), volumul specific global al sistemului bifazic poate fi dedus pe baza unei construcții grafice (v. fig. 127), care folosește metoda indicată la IV A.e., prin corectarea coeficientului de volum rezultat din folosirea diagramei fig. 43, ținînd seama de prezența condensatului, în funcție de presiune, de temperatură și de raportul volumetric dintre cele două faze rezultate în condițiile de suprafață (așa numita «rație de gaze» din condițiile de separator).

Folosirea acestei diagrame se face în modul următor: 1) Se determină presiunea și temperatura redusă a sistemului în condițiile de zăcămint, pe baza analizei separate a fracțiunilor «gaz» și «lichid» colectat la separator, combinate în proporția debitelor zilnice respective. 2) Se determină pe axa absciselor presiunea redusă, coborînd o dreaptă paralelă cu axa ordonatelor pînă la întîlnirea cu curba corespunzătoare temperaturii reduse (trasată în prealabil prin interpolare, dacă nu este reprezentată în diagramă). 3) Din acest punct se duce o dreaptă paralelă cu axa absciselor pînă la curba de rație gaze/țitei, corespunzătoare aceleia a sondei (sau mediei ponderate pe întregul zăcămint, cu debitele sondelor, în cazul determinării lui Z pentru a aprecia rezerva de gaze a unui zăcămint). 4) Din punctul de intersecție a dreptei paralele cu curba

Tabela 128. Transformarea gradelor API în densitate la 15,56 °C/15,56 °C

API	Zecimi de grad API									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	1,0443	1,0435	1,0427	1,0420	1,0412	1,0404	1,0397	1,0389	1,0382	1,0374
5	1,0366	1,0359	1,0351	1,0344	1,0335	1,0328	1,0321	1,0313	1,0306	1,0298
6	1,0291	1,0283	1,0276	1,0269	1,0261	1,0254	1,0246	1,0239	1,0231	1,0224
7	1,0217	1,0209	1,0202	1,0195	1,0187	1,0180	1,0173	1,0165	1,0158	1,0151
8	1,0143	1,0136	1,0129	1,0122	1,0114	1,0107	1,0100	1,0095	1,0086	1,0078
9	1,0071	1,0064	1,0057	1,0050	1,0043	1,0035	1,0028	1,0021	1,0014	1,0007
10	1,0000	0,9993	0,9986	0,9979	0,9972	0,9965	0,9758	0,9951	0,9944	0,9937
11	0,9930	0,9923	0,9916	0,9099	0,9902	0,9895	0,9888	0,9881	0,9874	0,9868
12	0,9861	0,9854	0,9847	0,9840	0,9833	0,9826	0,9820	0,9813	0,9806	0,9799
13	0,9792	0,9786	0,9779	0,9772	0,9765	0,9759	0,9752	0,9745	0,9738	0,9732
14	0,9725	0,9718	0,9712	0,9705	0,9698	0,9692	0,9685	0,9679	0,9672	0,9665
15	0,9659	0,9652	0,9646	0,9639	0,9632	0,9626	0,9619	0,9613	0,9606	0,9600
16	0,9593	0,9587	0,9580	0,9574	0,9567	0,9561	0,9554	0,9548	0,9541	0,9535
17	0,9525	0,9522	0,9516	0,9509	0,9503	0,9497	0,9490	0,9484	0,9478	0,9471
18	0,9465	0,9459	0,9452	0,9446	0,9440	0,9433	0,9427	0,9421	0,9416	0,9408
19	0,9402	0,9396	0,9390	0,9383	0,9377	0,9371	0,9365	0,9359	0,9352	0,9346
20	0,9340	0,9334	0,9328	0,9322	0,9315	0,9309	0,9303	0,9297	0,9291	0,9285
21	0,9279	0,9275	0,9267	0,9260	0,9254	0,9248	0,9242	0,9236	0,9230	0,9224
22	0,9218	0,9212	0,9206	0,9200	0,9194	0,9188	0,9182	0,9176	0,9170	0,9165
23	0,9159	0,9153	0,9147	0,9141	0,9135	0,9129	0,9123	0,9117	0,9112	0,9106
24	0,9100	0,9094	0,9089	0,9082	0,9076	0,9071	0,9065	0,9059	0,9053	0,9047
25	0,9042	0,9036	0,9030	0,9024	0,9010	0,9013	0,9007	0,9001	0,8996	0,8990
26	0,8984	0,8978	0,8975	0,8967	0,8961	0,8956	0,8950	0,8944	0,8939	0,8933
27	0,8927	0,8922	0,8916	0,8911	0,8905	0,8899	0,8894	0,8888	0,8882	0,8878
28	0,8873	0,8866	0,8866	0,8855	0,8849	0,8844	0,8838	0,8833	0,8827	0,8822
29	0,8216	0,8811	0,8805	0,8800	0,8794	0,8789	0,8783	0,8778	0,8772	0,8767
30	0,8762	0,8756	0,8751	0,8745	0,8740	0,8735	0,8729	0,8724	0,8718	0,8715
31	0,8708	0,8702	0,8697	0,8692	0,8686	0,8681	0,8676	0,8670	0,8665	0,8660
32	0,8654	0,8649	0,8644	0,8639	0,8633	0,8628	0,8623	0,8618	0,8612	0,8607
33	0,8602	0,8597	0,8591	0,8586	0,8581	0,8576	0,8571	0,8565	0,8560	0,8555
34	0,8550	0,8545	0,8540	0,8534	0,8529	0,8524	0,8519	0,8514	0,8509	0,8504
35	0,8498	0,8493	0,8488	0,8485	0,8478	0,8473	0,8468	0,8463	0,8458	0,8455
36	0,8448	0,8443	0,8438	0,8435	0,8429	0,8423	0,8418	0,8413	0,8408	0,8405
37	0,8399	0,8393	0,8388	0,8383	0,8378	0,8373	0,8368	0,8363	0,8358	0,8353
38	0,8348	0,8343	0,8338	0,8333	0,8328	0,8324	0,8329	0,8314	0,8309	0,8304
39	0,8289	0,8284	0,8289	0,8285	0,8280	0,8275	0,8270	0,8265	0,8260	0,8256
40	0,8251	0,8246	0,8241	0,8236	0,8232	0,8227	0,8222	0,8217	0,8212	0,8204
41	0,8203	0,8198	0,8198	0,8189	0,8184	0,8179	0,8174	0,8170	0,8165	0,8160
42	0,8155	0,8151	0,8146	0,8142	0,8127	0,8132	0,8128	0,8123	0,8118	0,8114
43	0,8109	0,8104	0,8100	0,8095	0,8090	0,8086	0,8081	0,8076	0,8072	0,8067
44	0,8063	0,8058	0,8054	0,8049	0,8044	0,8040	0,8035	0,8031	0,8026	0,8022
45	0,8017	0,8012	0,8008	0,8003	0,7999	0,7994	0,7989	0,7985	0,7981	0,7976
46	0,7972	0,7967	0,7963	0,7953	0,7959	0,7949	0,7945	0,7941	0,7936	0,7932
47	0,7927	0,7925	0,7918	0,7914	0,7909	0,7905	0,7901	0,7896	0,7892	0,7887
48	0,7883	0,7879	0,7874	0,7870	0,7865	0,7861	0,7857	0,7852	0,7848	0,7844
49	0,7839	0,7835	0,7831	0,7826	0,7822	0,7818	0,7815	0,7809	0,7805	0,7800
50	0,7796	0,7792	0,7788	0,7783	0,7779	0,7775	0,7770	0,7766	0,7762	0,7758
51	0,7753	0,7749	0,7745	0,7745	0,7732	0,7722	0,7728	0,7724	0,7720	0,7715
52	0,7711	0,7707	0,7703	0,7699	0,7694	0,7690	0,7686	0,7682	0,7678	0,7674
53	0,7669	0,7665	0,7661	0,7657	0,7650	0,7649	0,7645	0,7640	0,7636	0,7632
54	0,7628	0,7624	0,7620	0,7616	0,7612	0,7608	0,7603	0,7599	0,7595	0,7591
55	0,7507	0,7503	0,7503	0,7503	0,7503	0,7503	0,7503	0,7503	0,7503	0,7503
56	0,7547	0,7543	0,7539	0,7535	0,7531	0,7527	0,7523	0,7518	0,7515	0,7511
57	0,7507	0,7503	0,7499	0,7495	0,7491	0,7487	0,7483	0,7479	0,7475	0,7471
58	0,7467	0,7463	0,7459	0,7455	0,7451	0,7447	0,7443	0,7440	0,7436	0,7432
59	0,7428	0,7424	0,7420	0,7416	0,7412	0,7408	0,7405	0,7402	0,7397	0,7393
60	0,7289	0,7285	0,7281	0,7277	0,7274	0,7270	0,7266	0,7262	0,7258	0,7254
61	0,7251	0,7247	0,7243	0,7239	0,7235	0,7232	0,7228	0,7224	0,7220	0,7216
62	0,7213	0,7209	0,7205	0,7201	0,7197	0,7194	0,7190	0,7186	0,7182	0,7178
63	0,7275	0,7271	0,7268	0,7264	0,7260	0,7256	0,7255	0,7249	0,7245	0,7242
64	0,7238	0,7234	0,7230	0,7227	0,7223	0,7219	0,7216	0,7212	0,7208	0,7204
65	0,7201	0,7197	0,7194	0,7190	0,7186	0,7183	0,7179	0,7173	0,7172	0,7168

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE SISTEMELOR FLUIDE

323

(Continuarea tabeli 128)

API	Zecimi de grad API									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
66	0,7165	0,7161	0,7157	0,7154	0,7150	0,7146	0,7145	0,7139	0,7136	0,7132
67	0,7128	0,7125	0,7121	0,7118	0,7114	0,7111	0,7107	0,7103	0,7100	0,7096
68	0,7092	0,7089	0,7086	0,7082	0,7079	0,7075	0,7071	0,7068	0,7064	0,7061
69	0,7057	0,7054	0,7050	0,7047	0,7043	0,7040	0,7036	0,7033	0,7029	0,7026
70	0,7022	0,7019	0,7015	0,7012	0,7008	0,7005	0,7001	0,6998	0,6995	0,6991
71	0,6988	0,6984	0,6981	0,6977	0,6974	0,6970	0,6967	0,6964	0,6960	0,6957
72	0,6953	0,6950	0,6946	0,6943	0,6940	0,6936	0,6935	0,6929	0,6926	0,6923
73	0,6919	0,6916	0,6913	0,6909	0,6906	0,6902	0,6899	0,6896	0,6892	0,6890
74	0,6886	0,6882	0,6879	0,6876	0,6872	0,6866	0,6862	0,6862	0,6859	0,6856
75	0,6787	0,6783	0,6780	0,6777	0,6774	0,6770	0,6767	0,6764	0,6721	0,6823
76	0,6754	0,6751	0,6748	0,6745	0,6741	0,6738	0,6735	0,6732	0,6728	0,6727
77	0,6787	0,6783	0,6780	0,6777	0,6774	0,6770	0,6767	0,6764	0,6761	0,6755
78	0,6754	0,6751	0,6748	0,6745	0,6746	0,6738	0,6735	0,6732	0,6728	0,6727
79	0,6722	0,6719	0,6716	0,6713	0,6709	0,6706	0,6703	0,6700	0,6697	0,6695
80	0,6690	0,6687	0,6684	0,6681	0,6678	0,6675	0,6671	0,6663	0,6665	0,6662
81	0,6657	0,6655	0,6653	0,6649	0,6646	0,6643	0,6637	0,6634	0,6634	0,6631
82	0,6628	0,6625	0,6621	0,6618	0,6615	0,6612	0,6609	0,6606	0,6604	0,6600
83	0,6579	0,6594	0,6591	0,6588	0,6584	0,6581	0,6578	0,6575	0,6572	0,6569
84	0,6566	0,6563	0,6560	0,6557	0,6554	0,6551	0,6548	0,6545	0,6542	0,6539
85	0,6536	0,6533	0,6530	0,6527	0,6524	0,6521	0,6518	0,6515	0,6512	0,6509
86	0,6506	0,6503	0,6500	0,6497	0,6494	0,6481	0,6480	0,6485	0,6482	0,6479
87	0,6476	0,6473	0,6470	0,6467	0,6464	0,6461	0,6450	0,6453	0,6452	0,6449
88	0,6446	0,6444	0,6441	0,6438	0,6436	0,6432	0,6429	0,6426	0,6423	0,6420
89	0,6417	0,6414	0,6411	0,6409	0,6406	0,6403	0,6400	0,6397	0,6394	0,6391
90	0,6388	0,6385	0,6382	0,6380	0,6377	0,6374	0,6371	0,6368	0,6365	0,6362
91	0,6360	0,6357	0,6354	0,6251	0,6348	0,6354	0,6342	0,6340	0,6337	0,6334
92	0,6331	0,6328	0,6325	0,6223	0,6320	0,6317	0,6314	0,6311	0,6309	0,6306
93	0,6303	0,6300	0,6297	0,6297	0,6294	0,6289	0,6288	0,6283	0,6281	0,6278
94	0,6275	0,6272	0,6269	0,6267	0,6264	0,6261	0,6258	0,6256	0,6253	0,6250
95	0,6247	0,6242	0,6242	0,6239	0,6236	0,6235	0,6231	0,6228	0,6225	0,6225
96	0,6220	0,6127	0,6214	0,6212	0,6209	0,6206	0,6203	0,6101	0,6198	0,6195
97	0,6193	0,6190	0,6187	0,6184	0,6182	0,6179	0,6176	0,6174	0,6171	0,6168
98	0,6166	0,6163	0,6160	0,6158	0,6155	0,6152	0,6150	0,6147	0,6144	0,6141
99	0,6139	0,6136	0,6134	0,6131	0,6128	0,6126	0,6123	0,6120	0,6118	0,6116
100	0,6112									

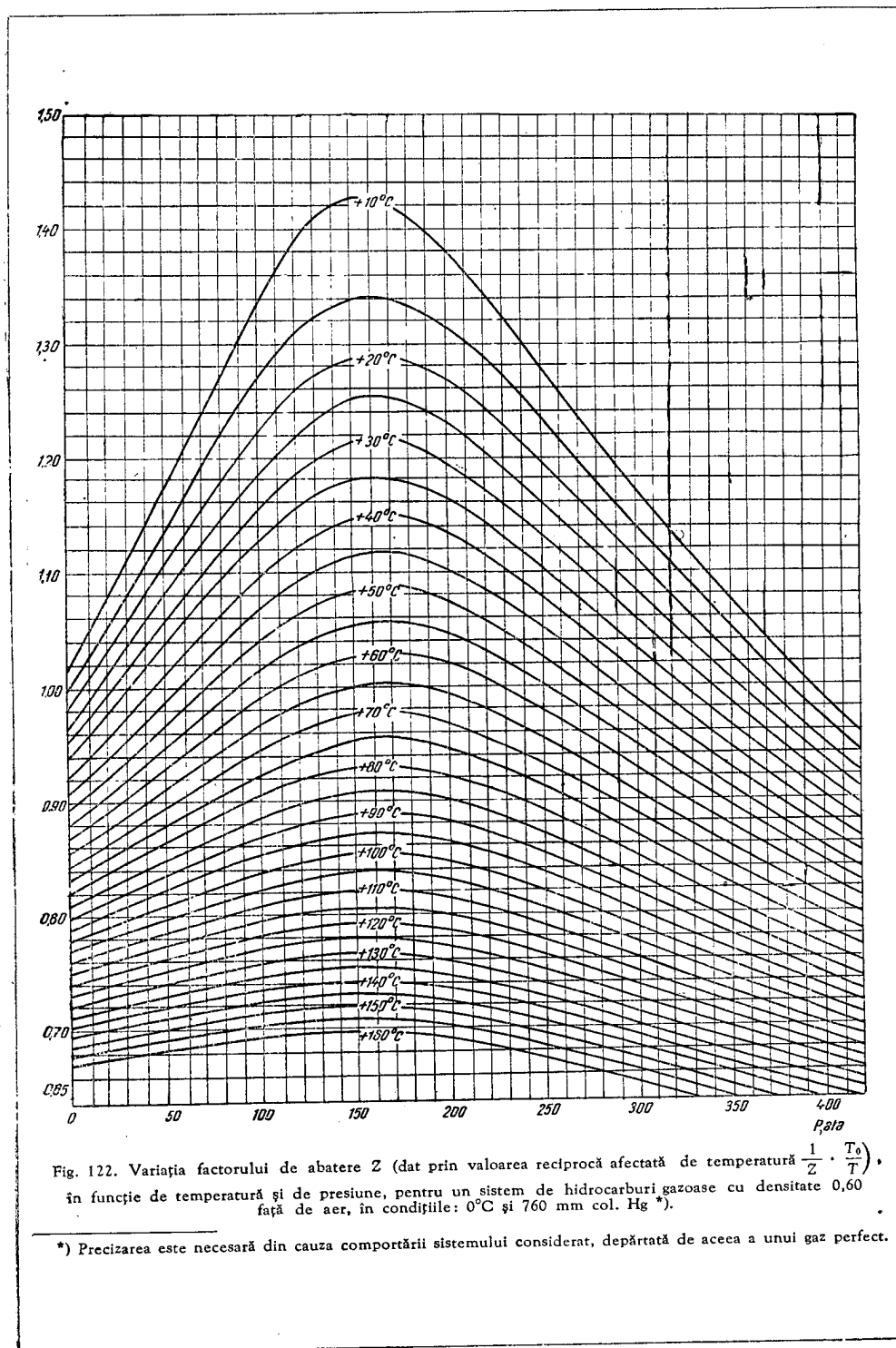
Tabela 129. Transformarea densității țiteiurilor de la $d_{15}^{15,56}$ la d_{20}^{20}

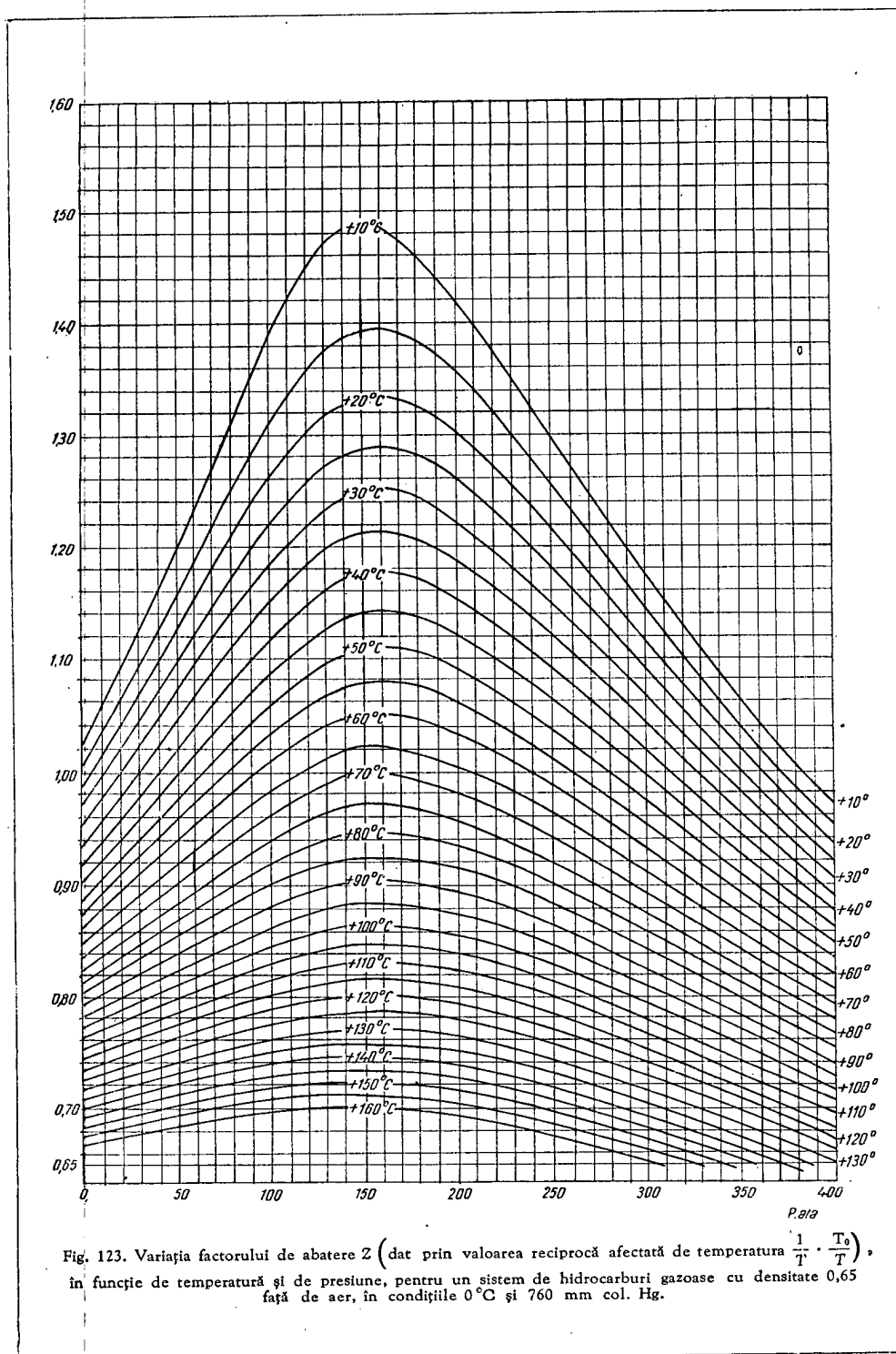
Densitatea d_{15}^{15} de treant în d_{20}^{20} sau invers	Numărul care trebuie scăzut, respectiv adăugat la densitate	Densitatea d_{15}^{15} de treant în d_{20}^{20} sau invers	Numărul care trebuie scăzut, respectiv adăugat la densitate
0,700—0,710	0,005 1	0,830—0,840	0,004 4
0,710—0,720	0,005 0	0,840—0,850	0,004 3
0,720—0,730	0,005 0	0,850—0,860	0,004 2
0,730—0,740	0,004 9	0,860—0,870	0,004 2
0,740—0,750	0,004 9	0,870—0,880	0,004 1
0,750—0,760	0,004 8	0,880—0,890	0,004 1
0,760—0,770	0,004 8	0,890—0,900	0,004 0
0,770—0,780	0,004 7	0,900—0,910	0,004 0
0,780—0,790	0,004 6	0,910—0,920	0,003 9
0,790—0,800	0,004 6	0,920—0,930	0,003 8
0,800—0,810	0,004 5	0,930—0,940	0,003 8
0,810—0,820	0,004 5	0,940—0,950	0,003 7
0,820—0,830	0,004 4	0,950—0,960	0,003 7

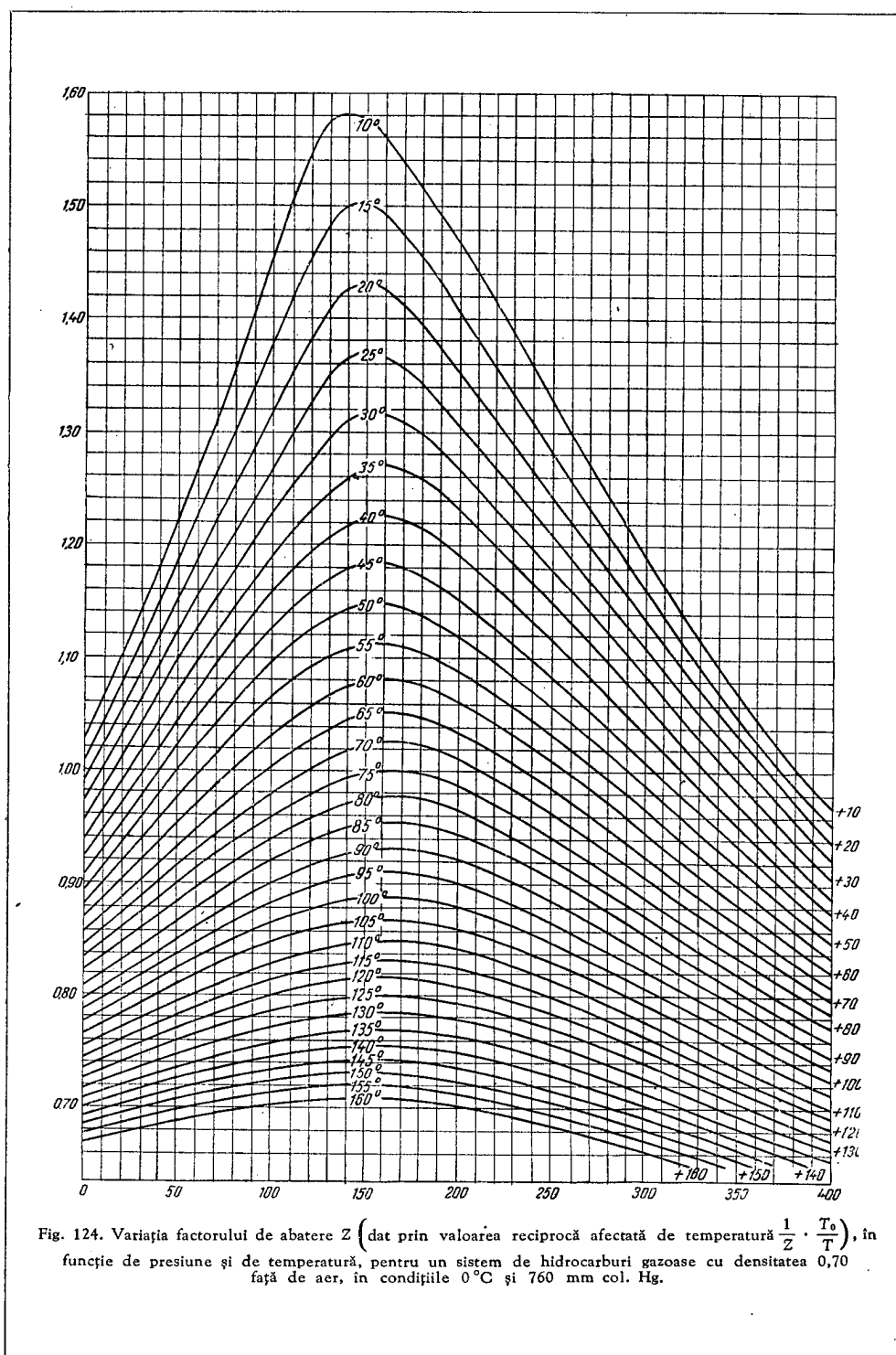
de rație, se duce o dreaptă paralelă cu axa ordonatelor până la intersecția cu curba de

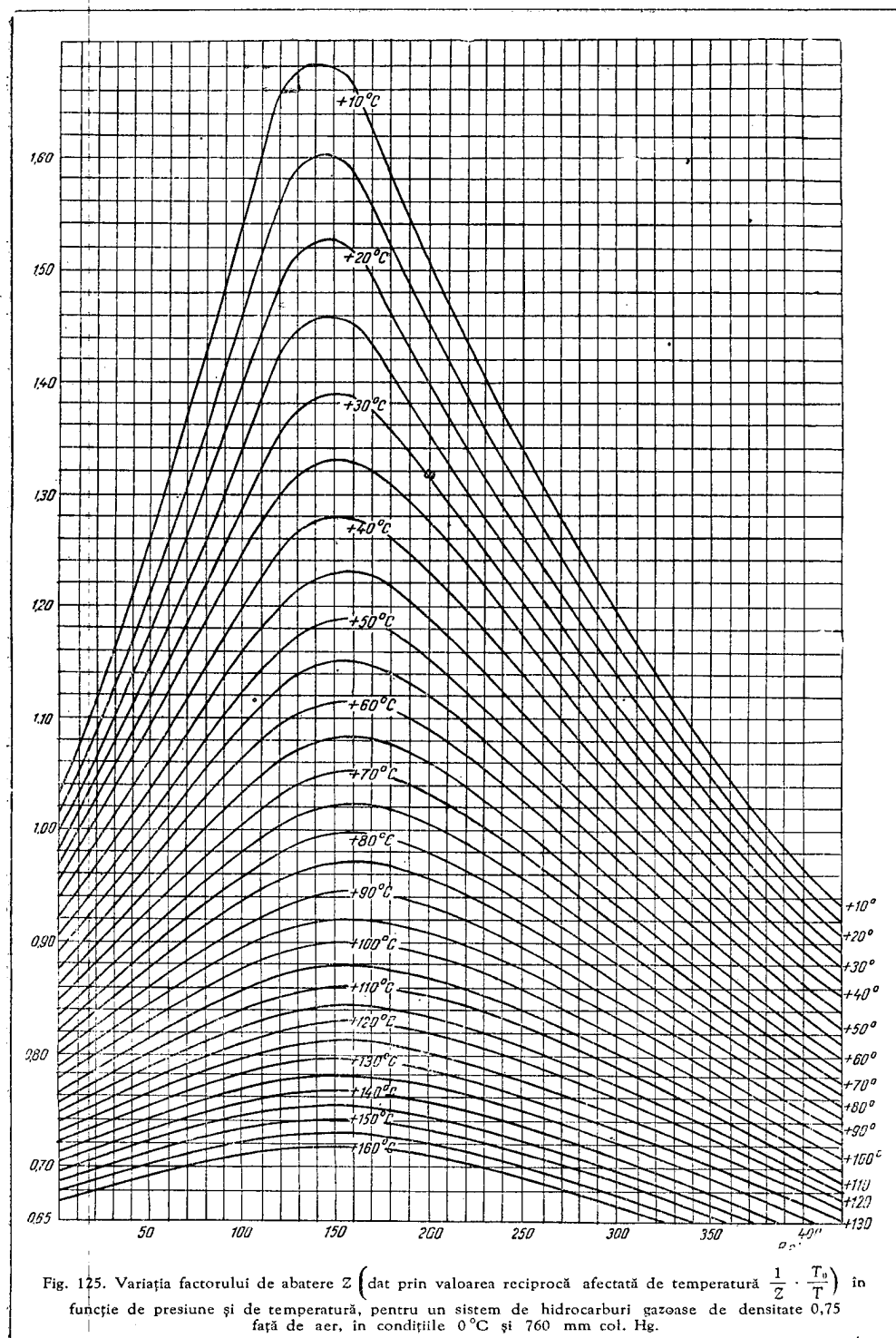
referință pentru presiunea redusă; 5) Din acest punct se duce o dreaptă paralelă cu axa absciselor până la întâlnirea axei ordonatelor, din dreapta figurii, pe care se citește, în punctul de intersecție, valoarea lui Z.

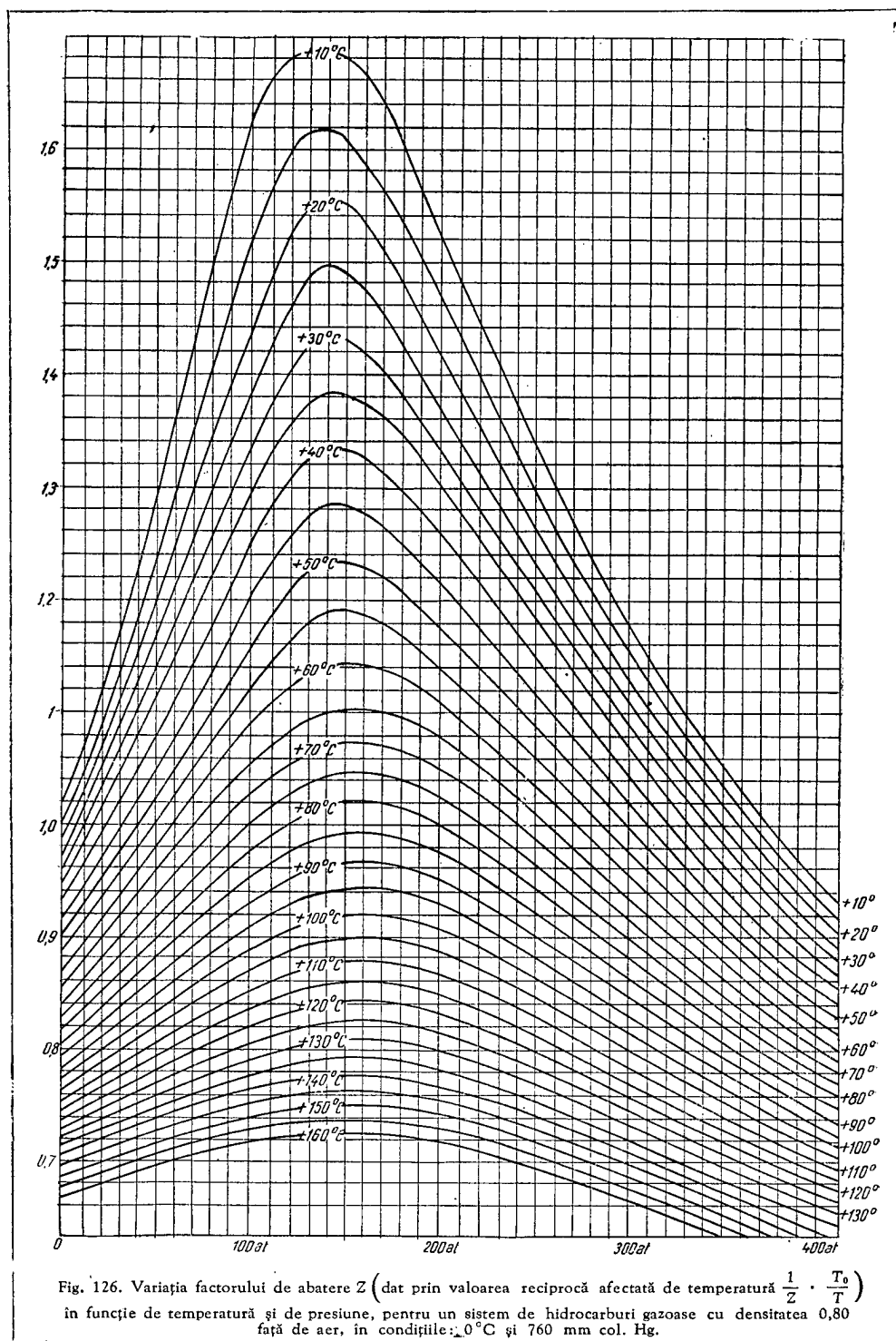
După cum valoarea rației este mai mare sau mai mică, se pot folosi diferite trepte de aproximație: o aproximație relativ satisfăcătoare constă în neglijarea volumului lichidului la calculul rezervei de gaze (fig. 128 dă eroarea făcută în acest mod, în funcție de rația de gaze); o aproximație nesatisfăcătoare constă în faptul că se face abstracție de abaterea gazelor de la legea gazelor perfecte. Cu toată aparența nesatisfăcătoare, această aproximație poate fi totuși suficientă în cazul adincimilor mari, prin compensație, datorită revenirii factorului Z către valori apropiate de unitate (fig 129 dă eroarea aproximativă astfel comisă, în funcție de adincime; diagrama este numai indicativă, fiind construită pe ipoteza unei legături de proporționalitate între adincime și presiune). O treaptă intermediară de aproximație o constituie tratarea ca monofază











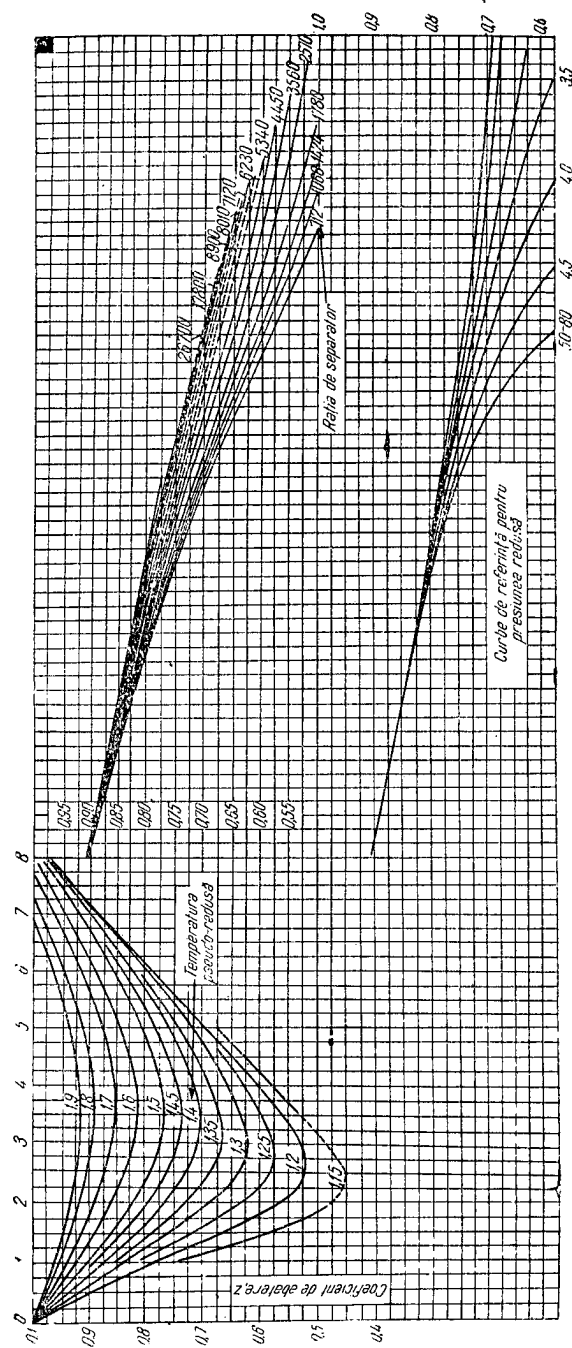


Fig. 127. Variația în funcție de temperatura de zăcămint, de presiunea de zăcămint, și de raportul volumetric între gaze și de lichide produse, în condițiile de suprafață (respectiv separator), a volumului unei cantități (ponderal determinată) de la condițiile de zăcămint la acelea de suprafață, volum gaz/volum gaz.

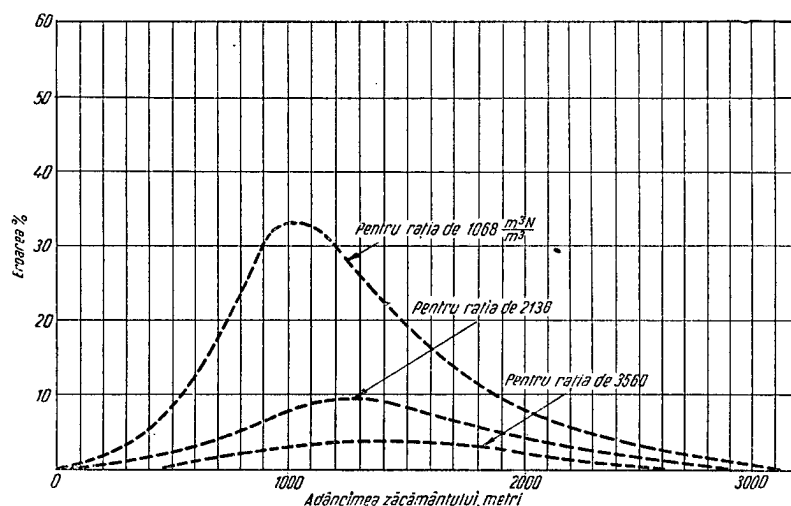


Fig. 128. Eroarea comisă asupra rezervei de gaze a unui zăcămint cu gaze parțial condensabile prin neglijarea volumului ocupat de lichid în zăcămint (supra-apreciere).

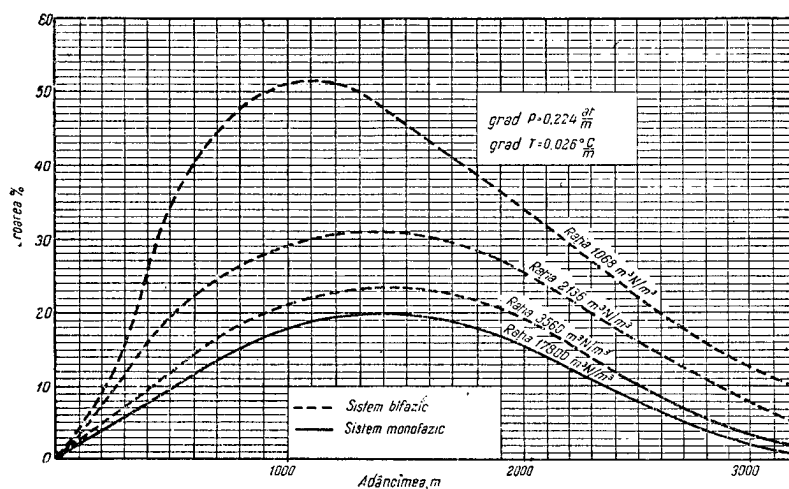


Fig. 129. Eroarea comisă asupra rezervei de gaze a unui zăcămint de gaze parțial condensabile, prin neglijarea factorului de abatere de la legea gazelor perfecte.

De observat domeniul de compensație ($Z \frac{T}{T_0} \approx 1$).

(după fig. 43) a unui sistem bifazic, aproximație satisfăcătoare numai în cazul rațiilor foarte mari, peste $\sim 2000 \text{ m}^3\text{N/m}^3$ (fig. 130 dă eroarea astfel comisă, în funcție de adâncime, în aceeași ipoteză de proporționalitate între aceasta și presiune).

Pentru sistemele cu «rație mare» sau mai exact pentru sistemele care cuprind componenți cu greutate moleculară foarte diferită

— Viscositatea sistemelor de hidrocarburi în condițiile de zăcămint se poate determina numai prin experiențe directe.

Viscositatea alcanilor la presiunea atmosferică, în starea gazoasă, respectiv de vapori, este dată în fig. 138, iar aceea sub presiune, în fig. 139.

Viscositatea alcanilor lichizi și a amestecurilor lor la presiunea atmosferică, în funcție

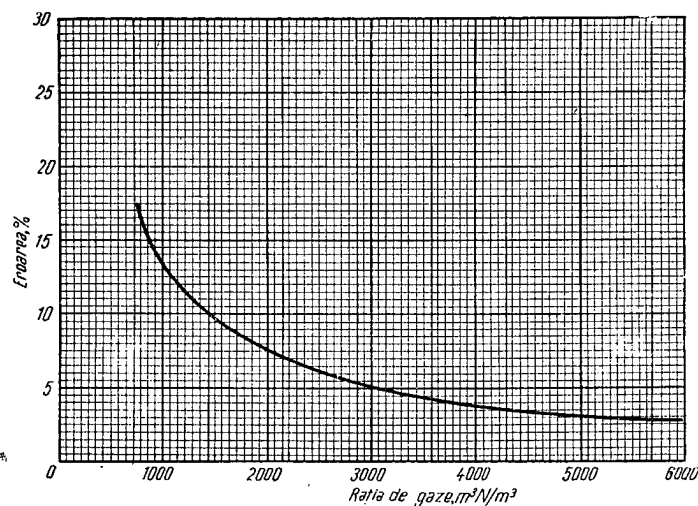


Fig. 130. Eroarea comisă asupra rezervei de gaze a unui zăcămint cu gaze parțial condensabile estimată cu neglijare diferenței dintre factorii de abatere corespunzători unui sistem bifazic, respectiv monofazic.

unul de altul, analiza comportării pe baza presiunilor și a temperaturilor reduse este cu atât mai nesatisfăcătoare, cu cât crește neomogenitatea lor din punctul de vedere al greutății moleculare. Pentru aceste sisteme, singura cale de cunoaștere a proprietăților fizice de comportare în cursul exploatării este determinarea experimentală a legii de stare și a relațiilor de compoziție a fazelor (v. IV B.d.2.c.).

— Proprietățile termice și cele termodinamice ale sistemelor de hidrocarburi au importanță în exploatarea zăcămintelor, practic, numai în cazul sistemelor cu greutate moleculară medie redusă («gaze»). În cazuri cu totul particulare, se pot folosi proprietățile individuale ale componentilor, prin aditivitate, dar, în general, se preferă și în acest caz determinarea proprietăților globale. Dintre proprietățile care prezintă interes fac parte: căldura specifică, căldura de vaporizare, entalpia și entropia. Pentru căldura specifică, C_p , la 1 at, valorile alcanilor sînt date în paralel cu greutatea moleculară în diagrama reprezentată în fig. 131.

Pentru proprietățile termice și pentru cele termodinamice ale țiguiurilor, v. vol. III.

de temperatură și de greutatea lor moleculară este dată în fig. 140.

Observație. Pentru amestecuri cu componenți a căror greutate moleculară se deosebește sensibil de cea medie, viscositatea reală este sensibil diferită de cea rezultată din aditivitate, astfel încît diagrama are o valoare de pură orientare.

Viscositatea țiguiurilor «moarte», la presiunea atmosferică, scade repede cu greutatea specifică, aproximativ după indicațiile date în fig. 141.

În cazul cînd presiunea constituie singurul parametru variabil, influența ei asupra viscosității sistemelor lichide de hidrocarburi este redusă. Fig. 142 prezintă această influență în cazul unei fracțiuni relativ înguste și rafinate.

Asupra sistemelor în care faza lichidă în contact cu cea gazoasă își poate schimba compoziția la variația presiunii, presiunea exercită un efect invers și de importanță mult mai mare. Intrarea în soluție a gazelor prin creșterea presiunii reduce simțitor viscositatea fazei lichide (v. fig. 143).

În general, viscositatea țiguiurilor în condițiile de zăcămint este influențată de presiune, de temperatură și de compoziția sistemului.

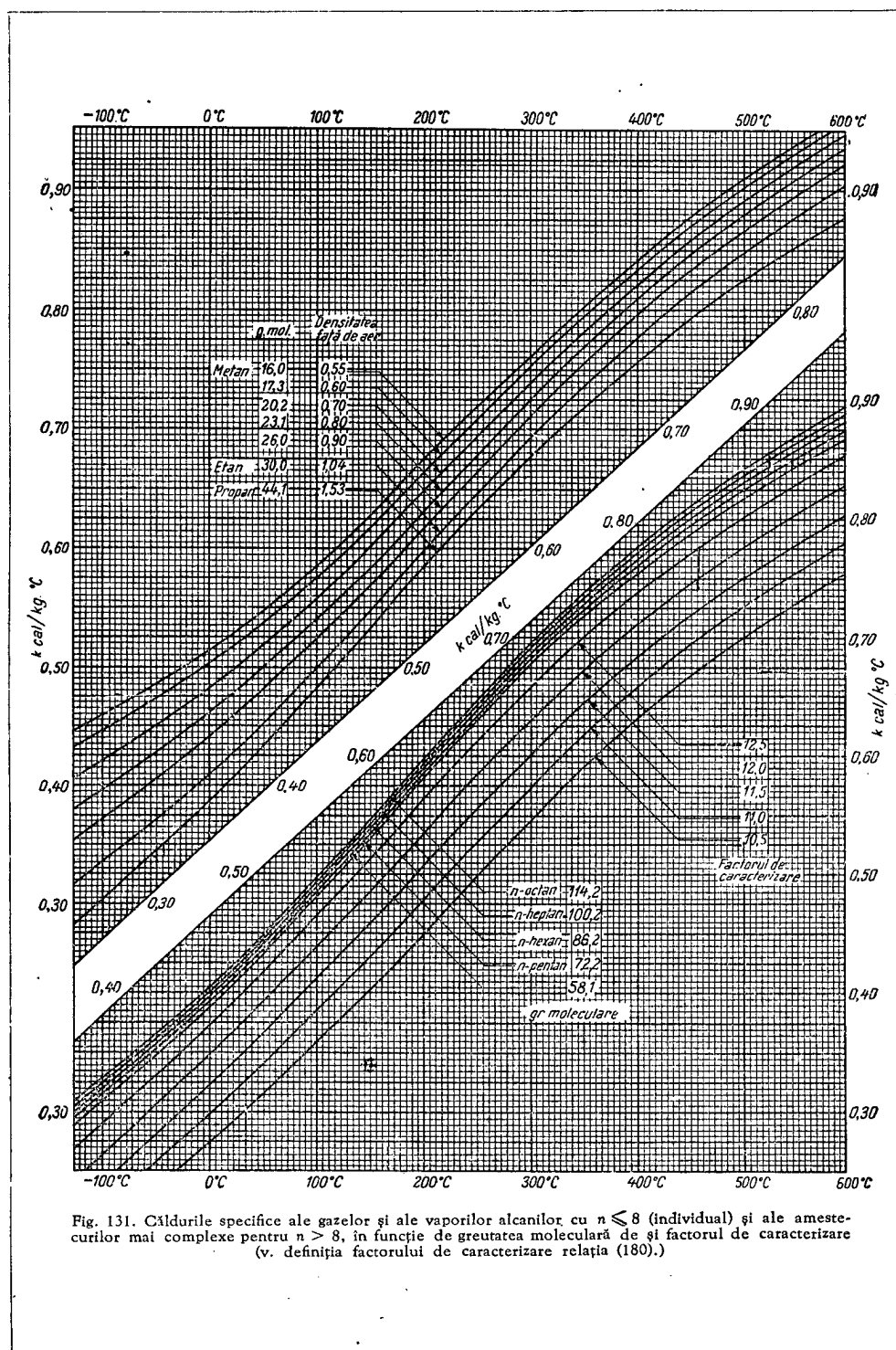


Fig. 131. Căldurile specifice ale gazelor și ale vaporilor alcanilor cu $n \leq 8$ (individual) și ale amestecurilor mai complexe pentru $n > 8$, în funcție de greutatea moleculară de și factorul de caracterizare (v. definiția factorului de caracterizare relația (180).)

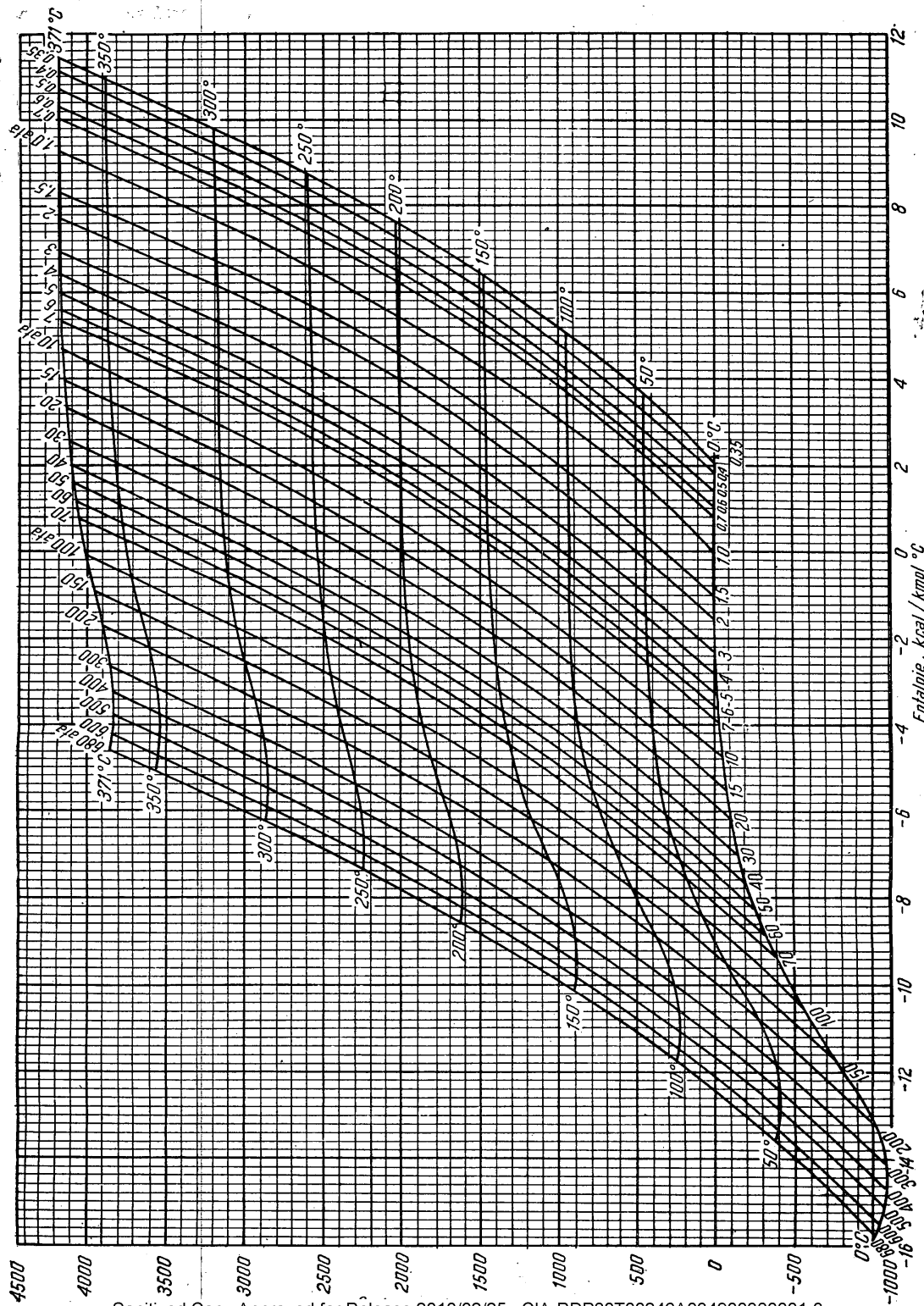


Fig. 132. Relația entalpie-entropie reprezentată prin izoterme și prin izobare pentru un gaz cu densitatea față de aer de 0,6, pentru greutatea specifică de 0,176 kg/m³ cu temperatura pseudocritică $t_f = 200^\circ\text{C}$ și presiunea pseudocritică $p_f = 45,72\text{ atm}$.

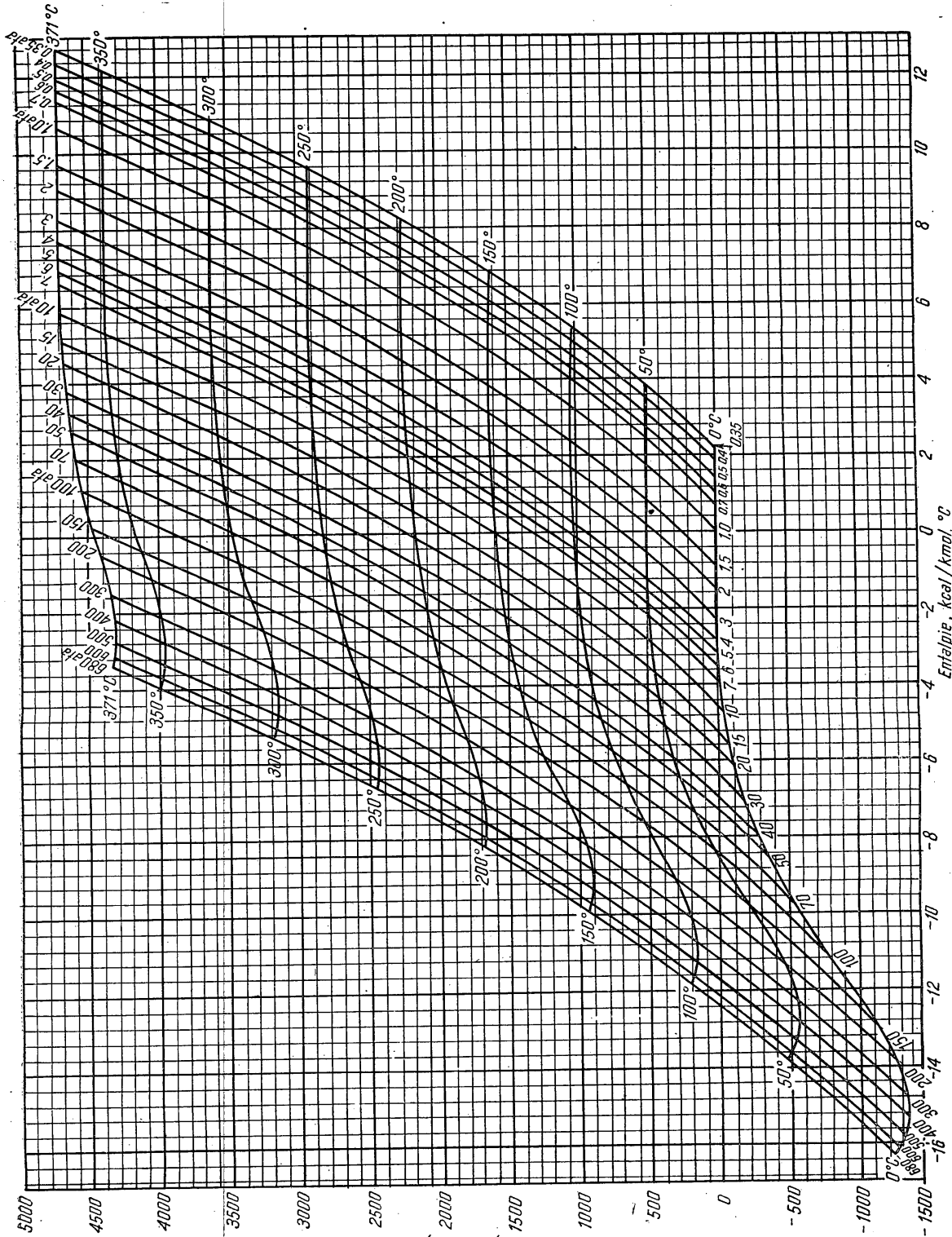


Fig. 133. Relația entalpie-entropie reprezentând prin izocorice și prin izobare pentru un gaz cu densitate față de aer de 0.70, pentru greutatea specifică de 0.904 kg m³N cu temperatura pseud $T_1 = 217.3$ K și presiunea pseud $P_1 = 15.19$ atm.

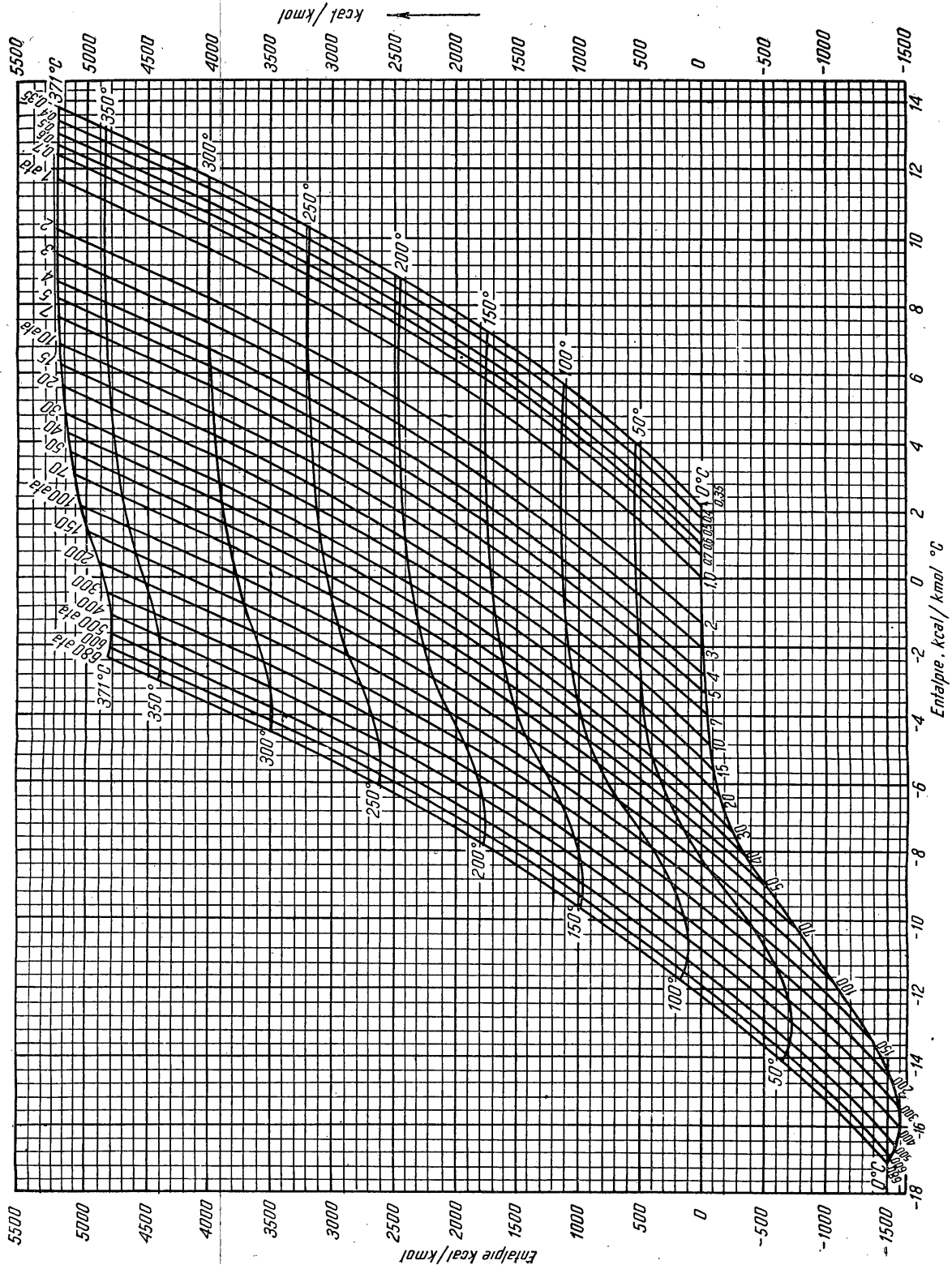


Fig. 134. Relația entalpie-entropie reprezentată prin izoterme și prin izobare pentru un gaz cu densitatea față de aer de 0,80, pentru greutatea specifică de 1,035 kg m⁻³ la temperatura pseudocritică $T_r = 235,6^\circ\text{K}$ și la presiunea pseudocritică $P_r = 45,04$ atm.

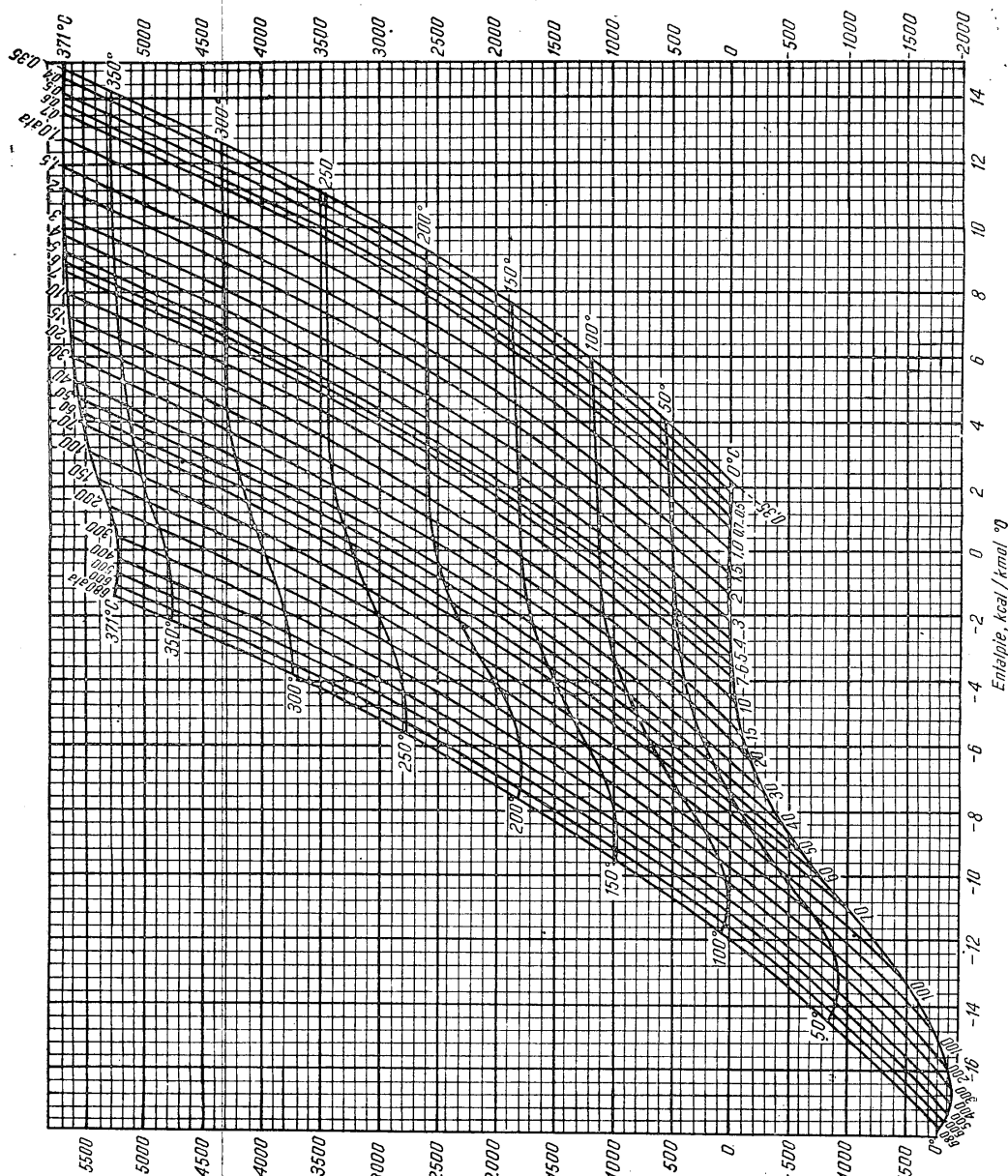


Fig. 135. Relația entalpie-entropie reprezentată pe diagramă și prin tabele pentru un gaz cu densitate constantă de aer de temperatură pseudocritică $T_p = 253,4^\circ\text{K}$ și presiune pseudocritică $p_p = 44,70\text{ atm}$.

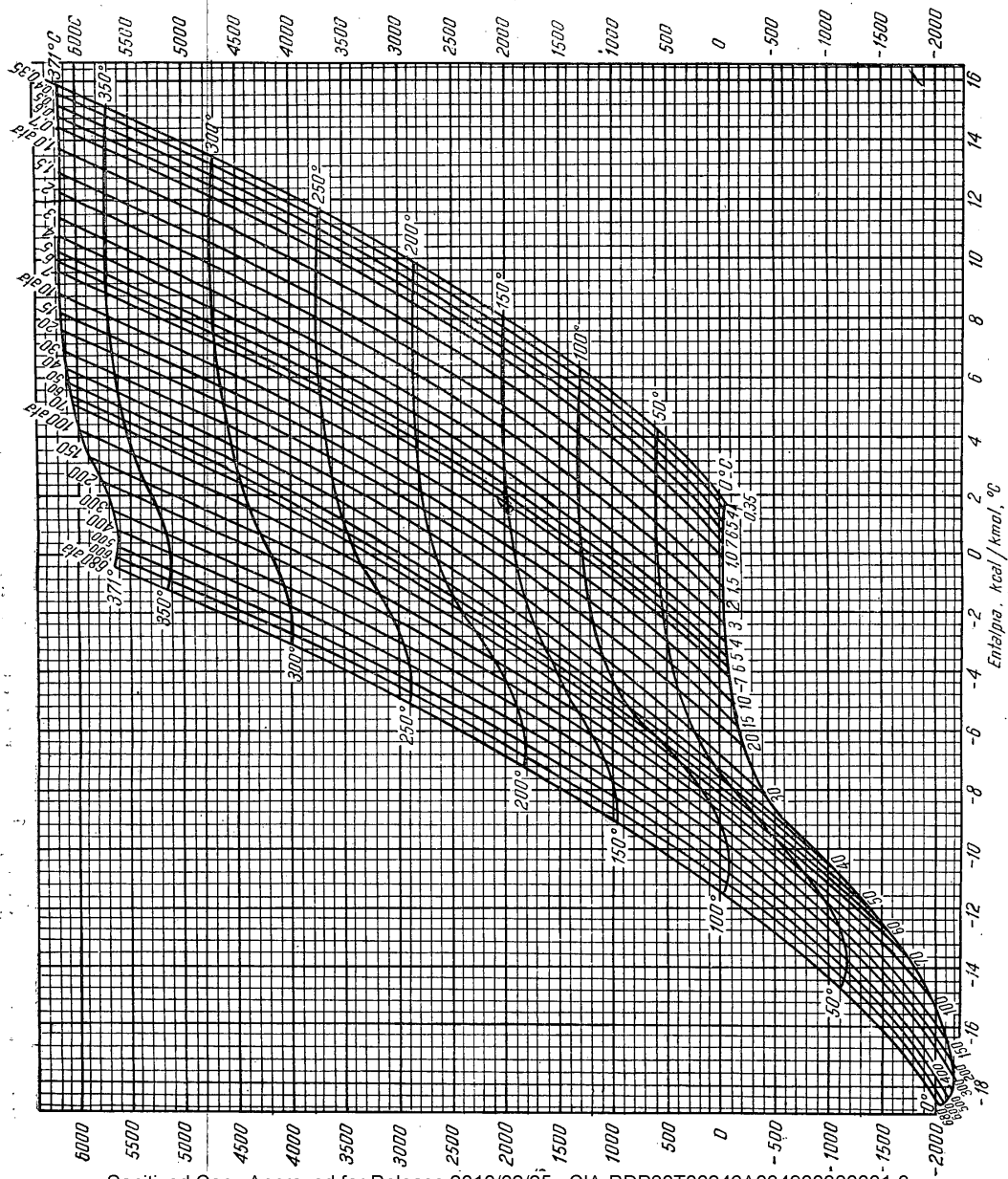


Fig. 136. Relația entalpie-entropie reprezentată prin izoterme și linii izobare pentru un gaz cu densitate $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$ la temperatura pseudocritică $T_p = 270.0^\circ\text{K}$ și presiunea pseudocritică $P_p = 41.33 \text{ atm}$.

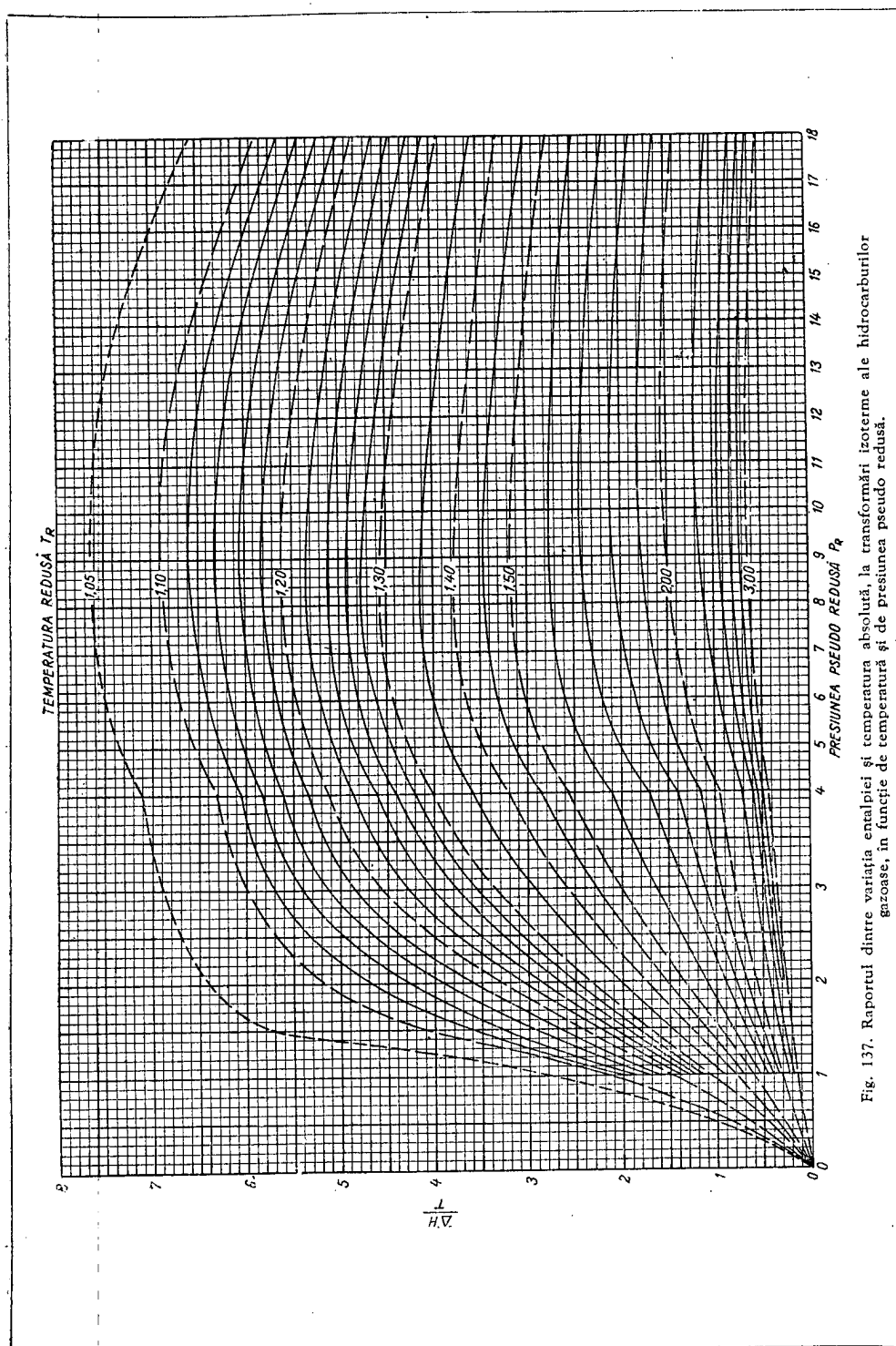


Fig. 137. Raportul dintre variația entalpiei și temperatura absolută, la transformări izoterme ale hidrocarburilor gazoase, în funcție de temperatură și de presiunea pseudo redusă.

astfel încât în locul valorilor indicative din diagramele fig. 138—143, este de preferat să se folosească totdeauna valorile rezultate din determinări experimentale (IV B.d.2.c).

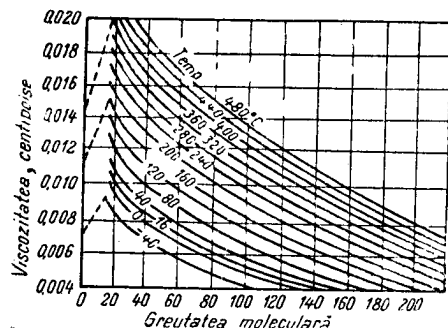


Fig. 138. Viscositatea absolută a alcanilor și a amestecurilor gazoase la presiunea atmosferică în funcție de temperatură și greutatea moleculară, μ , în poise $\times 10^{-8}$, (cP).

— Tensiunea superficială și cea interfacială. Tensiunea superficială, care ia naștere în suprafața de separație dintre un lichid și vaporii lui saturanți, este deseori confundată, în practică, cu aceea de la suprafața de separație dintre lichidul respectiv și atmosferă. Tensiunea interfacială este cea produsă în suprafața de separație dintre două faze oarecare.

Tensiunea superficială a țițeiurilor în condiții atmosferice (la circa 25°C) este, în general, de 24—38 dyn/cm v. fig. 145. Ea este influențată mult de temperatură și de compoziția sistemului.

Temperatura o reduce, iar greutatea moleculară mărită îi corespunde o tensiune superficială mai mare (v. fig. 144). Presiunea o reduce

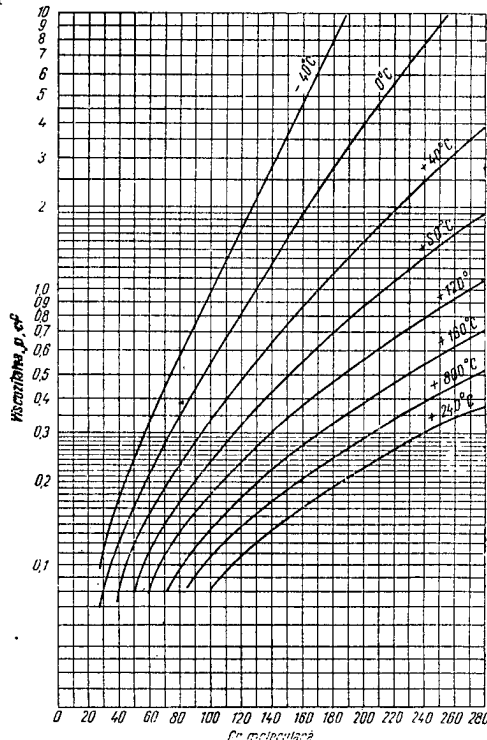


Fig. 140. Viscositatea în starea lichidă a alcanilor și a amestecurilor lor de eterogenitate limitată, la presiunea atmosferică în funcție de temperatură și de presiune, μ , în poise $\times 10^{-8}$.

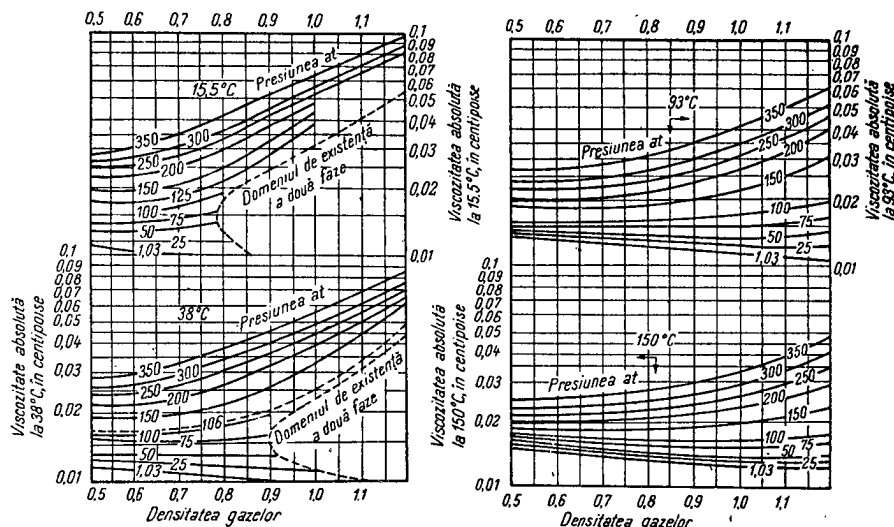


Fig. 139. Variația în funcție de presiune și de temperatură, a viscozităților sistemelor compuse din alcani în stare gazoasă, în funcție de greutatea moleculară medie: — — — limita domeniului bifazic.

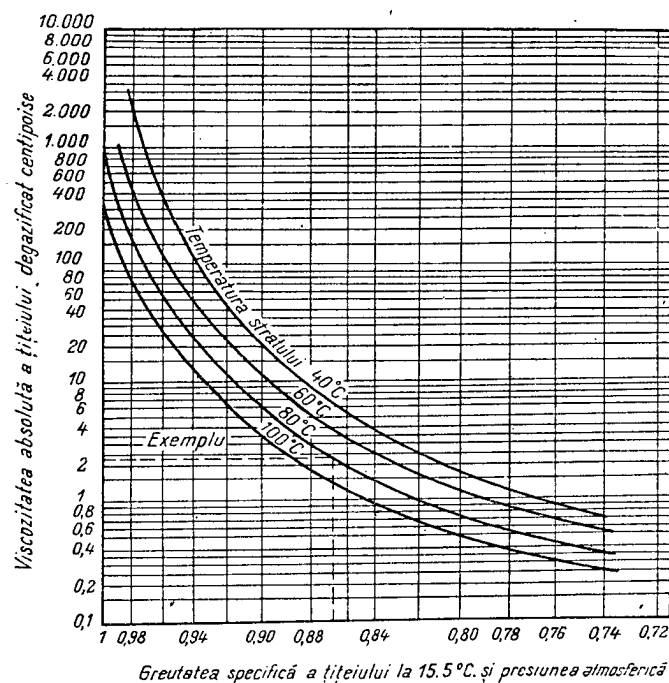


Fig. 141. Variația în funcție de greutatea specifică, la presiunea atmosferică a viscozității țițeiurilor lipsite de gaze.

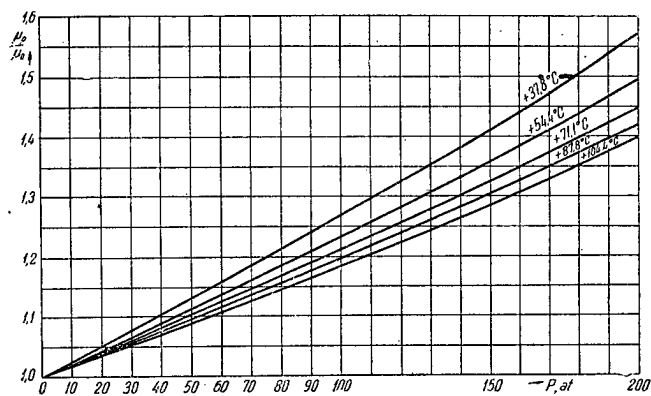


Fig. 142. Variația raportului dintre viscozitatea sub presiune și cea normală pentru un ulei de parafină rafinat.

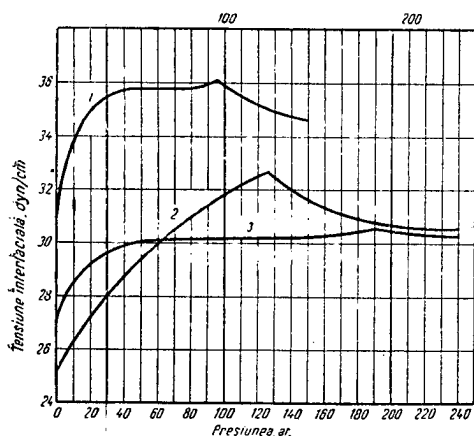


Fig. 147. Variația tensiunii interfaciale țigeli-apă de zăcămint, pentru diferite țigeli și pentru apele respective: 1 — țigeli cu densitatea: $d_4^{20} = 0,8534$ care, prin detentă de la condițiile de zăcămint (213 ata și 78,9°C) la 1 ata și la 23,3°C, eliberează 114 m³N gaze/m³ țigeli; 2 — țigeli cu densitatea: $d_4^{20} = 0,8360$ care, prin detentă de la condițiile de zăcămint (139,4 ata și 73,3°C) la 1 ata și la 23,3°C eliberează 98 m³N gaze/m³ țigeli; 3 — țigeli cu densitatea: $d_4^{20} = 0,8445$ care, prin detentă de la condițiile de zăcămint (107,8 ata și 54,4°C) la 1 ata și la 23,3°C, eliberează din soluție 116 m³N gaze țigeli.

exactitatea metodelor citate scade. Chiar metoda coeficienților de echilibru, determinați experimental asupra unor sisteme cu compoziție apropiată, nu este satisfăcătoare într-o anumită gamă foarte restrinsă în jurul punctului critic (de ordinul $\pm 0,02 T_r$ sau P_r). În aceste game foarte restrinse, repartizarea componentelor între faze nu poate fi determinată decât experimental, prin separarea fazelor și prin analiza lor fracțională.

Pentru echilibrul alcanilor inferiori într-un țigeli cu greutatea moleculară 240, la diferite temperaturi, se recomandă coeficienții de repartizare K dați în tabela 130 și următoarele.

Pentru problemele curente de exploatare, se folosește deseori ipoteza solubilității liniare (cu presiune) a componentelor gazoși în condițiile normale, în țigeliuri. Legea este aproximativă, deoarece prezența în «gaze» a unor componente cu greutate moleculară mai mare decât a metanului (constituentul principal) imprimă, în funcție de presiune, o variație a cantității de gaze aflate în soluție, mai rapidă la presiunile joase. Aceasta se datorește faptului că componentii mai grei intră aproape integral în soluție între 1 și 15–20 ata, astfel încât la presiuni mai mari nu se mai dizolvă, respectiv eliberează, decât metanul.

Tabela 130. Coeficienții de repartizare ai alcanilor într-un țigeli cu greutatea moleculară 240°C la + 4,44°C.

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptan și superioare
				Izo	Normal	Izo	Normal		
1,020	210	21	4,9	1,8	1,20	0,41	0,29	0,11	0,004 3
1,361	160	16	3,7	1,3	0,91	0,31	0,22	0,085	0,003 3
1,701	130	12	2,9	1,1	0,13	0,25	0,18	0,069	0,002 7
2,041	110	10	2,5	0,90	0,62	0,21	0,15	0,058	0,002 4
2,722	84	7,9	1,9	0,70	0,48	0,17	0,12	0,045	0,001 9
3,402	64	6,3	1,5	0,57	0,39	0,14	0,094	0,038	0,001 6
4,082	53	5,3	1,3	0,48	0,33	0,12	0,080	0,032	0,001 4
4,762	45	4,5	1,1	0,42	0,29	0,10	0,070	0,028	0,001 2
5,432	40	4,0	1,0	0,38	0,26	0,093	0,063	0,015	0,001 1
6,123	35	3,6	0,90	0,31	0,24	0,085	0,058	0,023	0,001 0
6,804	32	3,2	0,81	0,31	0,22	0,078	0,053	0,021	0,000 9
8,16	27	2,7	0,70	0,27	0,19	0,068	0,047	0,018	0,000 8
9,52	23	2,4	0,61	0,24	0,17	0,062	0,042	0,016	0,000 7
10,88	20	2,1	0,55	0,22	0,15	0,056	0,038	0,015	0,000 7
12,24	18	1,9	0,50	0,20	0,14	0,052	0,036	0,014	0,000 6
13,61	16	1,7	0,45	0,19	0,13	0,049	0,034	0,013	0,000 6
17,01	13	1,4	0,38	0,17	0,12	0,043	0,030	0,011	0,000 5
20,41	1,1	1,2	0,33	0,15	0,11	0,040	0,028	0,010	0,000 5
23,81	9,3	1,1	0,30	0,14	0,10	0,037	0,027	0,010	0,000 5
27,22	8,2	1,0	0,28	0,13	0,092	0,035	0,026	0,009	0,000 5
34,02	6,7	0,86	0,25	0,12	0,095	0,034	0,025	0,009	0,000 5
40,82	5,7	0,78	0,23	0,11	0,082	0,034	0,025	0,009	0,000 5
47,62	5,0	0,72	0,22	0,11	0,080	0,034	0,025	0,010	0,000 5
54,32	4,5	0,69	0,21	0,11	0,080	0,036	0,026	0,011	0,000 5
61,23	4,1	0,66	0,21	0,12	0,082	0,038	0,027	0,012	0,000 6
68,04	3,8	0,65	0,22	0,12	0,084	0,041	0,028	0,013	0,000 7
81,60	3,4	0,63	0,23	0,13	0,093	0,048	0,033	0,016	0,000 9
95,20	3,1	0,62	0,24	0,15	0,10	0,057	0,039	0,020	0,001 2
108,88	2,8	0,62	0,26	0,17	0,11	0,068	0,044	0,025	0,001 7
122,4	2,6	0,62	0,27	0,19	0,13	0,080	0,055	0,030	0,002 3
136,1	2,5	0,62	0,30	0,21	0,15	0,094	0,065	0,039	0,003 2
149,7	2,4	0,62	0,33	0,24	0,17	0,11	0,080	0,047	0,004 5
163,2	2,3	0,63	0,36	0,27	0,19	0,13	0,090	0,055	0,006 0
176,8	2,2	0,63	0,39	0,30	0,21	0,15	0,11	0,070	0,008 0
190,5	2,1	0,64	0,42	0,34	0,24	0,17	0,13	0,086	0,010
204,1	2,0	0,64	0,45	0,38	0,27	0,20	0,15	0,11	0,014

Tabela 131. Coeficienții de repartiție ai alcanilor într-un țitei de greutate moleculară, 240, la temperatura de + 15,56°C

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
1,020	225	26	6,6	2,5	1,7	0,64	0,47	0,18	0,008 0
1,361	175	19	4,9	1,9	1,3	0,48	0,35	0,14	0,006 0
1,701	138	16	3,9	1,5	1,0	0,38	0,29	0,11	0,005 0
2,041	118	13	3,3	1,3	0,88	0,32	0,24	0,096	0,004 2
2,722	85	9,8	2,5	0,97	0,68	0,25	0,18	0,075	0,003 3
3,402	68	7,9	2,0	0,80	0,55	0,20	0,15	0,061	
4,082	57	6,7	1,7	0,66	0,47	0,17	0,13	0,053	0,002 7
4,762	50	5,0	1,5	0,59	0,41	0,15	0,11	0,046	0,002 3
5,432	43	5,0	1,3	0,53	0,37	0,14	0,10	0,041	0,002 0
6,123	38	4,4	1,2	0,48	0,33	0,12	0,092	0,038	0,001 8
6,804	35	4,0	1,1	0,44	0,30	0,11	0,085	0,035	0,001 7
8,16	29	3,4	0,93	0,38	0,27	0,10	0,074	0,030	0,001 6
9,52	25	2,9	0,81	0,34	0,24	0,090	0,066	0,026	0,001 4
10,88	21	2,6	0,73	0,31	0,21	0,080	0,060	0,024	0,001 3
12,24	19	2,3	0,66	0,28	0,20	0,076	0,056	0,022	0,001 1
13,61	17	2,1	0,60	0,26	0,18	0,070	0,053	0,021	0,001 0
17,01	14	1,7	0,50	0,23	0,10	0,062	0,047	0,018	0,000 9
20,41	12	1,5	0,44	0,21	0,14	0,058	0,043	0,016	0,000 8
23,81	9,9	1,3	0,39	0,19	0,13	0,055	0,040	0,015	0,000 8
27,22	8,7	1,2	0,36	0,18	0,12	0,053	0,039	0,015	0,000 8
34,02	7,1	1,0	0,31	0,16	0,12	0,050	0,038	0,014	0,000 8
40,82	6,1	0,90	0,29	0,15	0,11	0,050	0,037	0,014	0,000 7
47,62	5,3	0,84	0,27	0,15	0,11	0,050	0,037	0,015	0,000 8
54,32	4,7	0,80	0,27	0,15	0,11	0,051	0,037	0,016	0,000 8
61,23	4,3	0,78	0,27	0,15	0,11	0,053	0,038	0,017	0,000 9
68,04	4,0	0,76	0,27	0,15	0,11	0,056	0,040	0,018	0,001 0
81,60	3,5	0,72	0,28	0,17	0,12	0,064	0,048	0,022	0,001 3
95,20	3,2	0,70	0,28	0,18	0,13	0,074	0,055	0,026	0,001 7
108,8	2,9	0,69	0,30	0,20	0,14	0,086	0,063	0,032	0,002 2
122,4	2,7	0,68	0,32	0,22	0,16	0,10	0,074	0,039	0,003 0
136,1	2,5	0,68	0,34	0,25	0,17	0,11	0,085	0,043	0,004 0
159,7	2,4	0,68	0,36	0,28	0,19	0,13	0,098	0,057	0,005 4
183,2	2,3	0,68	0,39	0,31	0,21	0,15	0,11	0,068	0,007 2
176,8	2,2	0,68	0,42	0,43	0,24	0,17	0,13	0,084	0,009 4
190,5	2,1	0,68	0,45	0,38	0,26	0,19	0,15	0,10	0,012
204,1	2,0	0,69	0,48	0,41	0,28	0,22	0,17	0,12	0,015

Tabela 132. Coeficienții de repartiție ai alcanilor într-un țitei cu greutatea moleculară 240, la temperatura de + 26,87°C

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
1,020	240	31	8,6	3,3	2,5	0,94	0,72	0,29	0,012
1,361	183	23	6,4	2,5	1,9	0,70	0,54	0,22	0,009 5
1,701	145	19	5,2	2,0	1,5	0,56	0,43	0,18	0,007 8
2,041	120	15	4,3	1,7	1,3	0,47	0,36	0,15	0,006 6
2,722	90	12	3,3	1,3	0,96	0,36	0,28	0,12	0,005 2
3,402	72	9,4	2,7	1,1	0,79	0,29	0,23	0,096	0,004 3
4,082	60	7,8	2,2	0,98	0,67	0,25	0,19	0,082	0,003 7
4,762	54	6,7	1,9	0,80	0,58	0,22	0,17	0,072	0,003 2
5,432	45	5,9	1,7	0,71	0,54	0,19	0,15	0,064	0,002 9
6,123	40	5,3	1,5	0,64	0,47	0,18	0,14	0,058	0,002 7
6,804	36	4,8	1,4	0,60	0,43	0,16	0,13	0,053	0,002 5
8,16	30	4,1	1,2	0,52	0,38	0,14	0,11	0,045	0,002 2
9,52	26	3,5	1,0	0,46	0,33	0,13	0,098	0,040	0,001 9
10,88	22	3,1	0,93	0,42	0,29	0,11	0,089	0,036	0,001 8
12,24	20	2,8	0,84	0,38	0,27	0,11	0,082	0,033	0,001 7
13,61	18	2,5	0,76	0,35	0,25	0,10	0,077	0,031	0,001 5

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE SISTEMELOR FLUIDE

339

Tabela 132 (continuare)

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
17,01	15	2,1	0,63	0,30	0,22	0,087	0,068	0,027	0,001 4
20,41	12	1,8	0,55	0,27	0,19	0,080	0,062	0,024	0,001 3
23,81	10	1,6	0,48	0,25	0,18	0,075	0,059	0,023	0,001 2
27,22	9,1	1,4	0,44	0,23	0,16	0,072	0,056	0,022	0,001 1
34,02	7,4	1,2	0,38	0,21	0,15	0,068	0,054	0,020	0,001 1
40,82	6,5	1,1	0,35	0,20	0,14	0,066	0,053	0,020	0,001 1
47,62	5,5	1,0	0,33	0,19	0,14	0,066	0,054	0,021	0,001 1
54,32	4,9	0,94	0,32	0,19	0,13	0,067	0,055	0,022	0,001 2
61,23	4,5	0,89	0,32	0,19	0,14	0,070	0,057	0,023	0,001 3
68,04	4,1	0,86	0,31	0,19	0,14	0,074	0,060	0,025	0,001 4
81,60	3,6	0,80	0,31	0,20	0,15	0,082	0,066	0,029	0,001 8
95,20	3,3	0,78	0,32	0,22	0,16	0,093	0,074	0,035	0,001 3
108,8	3,0	0,76	0,33	0,24	0,17	0,11	0,084	0,041	0,002 9
122,4	2,8	0,75	0,35	0,26	0,18	0,12	0,094	0,043	0,003 8
136,1	2,6	0,74	0,37	0,28	0,20	0,14	0,11	0,056	0,005 0
159,7	2,5	0,74	0,40	0,31	0,22	0,15	0,12	0,067	0,006 5
163,2	2,4	0,74	0,42	0,34	0,24	0,17	0,19	0,080	0,008 4
176,8	2,3	0,74	0,45	0,37	0,26	0,19	0,15	0,094	0,010
190,5	2,2	0,74	0,47	0,40	0,28	0,21	0,17	0,11	0,013
204,1	2,1	0,74	0,50	0,43	0,30	0,23	0,19	0,13	0,017

Tabela 133. Coeficienții de repartitie ai alcanilor într-un țicci cu greutatea moleculară 240, la temperatura de + 37,78°C

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
1,020	290	37	11	4,5	3,4	1,3	1,0	0,44	0,019
1,361	190	28	8,1	3,4	2,6	1,0	0,77	0,34	0,015
1,701	150	22	6,5	2,7	2,1	0,80	0,62	0,27	0,012
2,041	130	18	5,4	2,3	1,7	0,67	0,52	0,23	0,010
2,722	94	14	4,1	1,8	1,3	0,53	0,40	0,18	0,007 9
3,402	75	11	3,3	1,5	1,1	0,43	0,33	0,14	0,006 5
4,082	63	9,3	2,8	1,2	0,92	0,35	0,28	0,12	0,005 6
4,762	57	8,0	2,4	1,1	0,79	0,31	0,25	0,11	0,004 9
5,432	47	7,0	2,1	1,0	0,70	0,27	0,22	0,095	0,004 4
6,123	42	6,3	1,9	0,86	0,63	0,25	0,20	0,086	0,004 0
6,804	37	5,7	1,8	0,79	0,57	0,22	0,18	0,079	0,003 7
8,16	31	4,8	1,5	0,68	0,49	0,19	0,16	0,067	0,003 2
9,52	27	4,1	1,3	0,60	0,43	0,17	0,14	0,060	0,002 9
10,88	23	3,7	1,2	0,54	0,39	0,15	0,13	0,054	0,002 6
12,24	21	3,3	1,1	0,50	0,36	0,14	0,12	0,050	0,002 4
13,61	19	3,0	1,0	0,46	0,33	0,13	0,11	0,046	0,002 3
17,01	15	2,5	0,79	0,40	0,28	0,12	0,094	0,039	0,002 0
20,41	12	2,1	0,69	0,35	0,25	0,11	0,085	0,035	0,001 8
23,81	11	1,9	0,61	0,32	0,23	0,10	0,080	0,033	0,001 7
27,22	9,7	1,7	0,56	0,30	0,21	0,095	0,076	0,030	0,001 6
34,02	7,7	1,4	0,49	0,27	0,19	0,089	0,073	0,029	0,001 6
40,82	6,8	1,3	0,44	0,25	0,18	0,087	0,072	0,028	0,001 6
47,62	5,7	1,2	0,41	0,24	0,17	0,087	0,073	0,028	0,001 6
54,32	5,1	1,1	0,40	0,23	0,17	0,088	0,075	0,029	0,001 7
61,23	4,7	1,0	0,39	0,23	0,17	0,090	0,077	0,031	0,001 8
68,04	1,3	0,96	0,38	0,24	0,17	0,094	0,080	0,033	0,001 9
81,60	3,7	0,90	0,33	0,25	0,18	0,10	0,087	0,038	0,002 3
95,20	3,3	0,86	0,33	0,26	0,19	0,11	0,096	0,044	0,002 9
108,8	3,0	0,82	0,39	0,28	0,20	0,13	0,11	0,051	0,003 7
122,4	2,8	0,81	0,40	0,30	0,22	0,14	0,12	0,059	0,004 7
136,1	2,6	0,80	0,42	0,32	0,23	0,16	0,13	0,068	0,006 0
159,7	2,5	0,78	0,44	0,35	0,25	0,17	0,15	0,079	0,007 6
163,2	2,4	0,78	0,46	0,37	0,27	0,19	0,16	0,090	0,008 6
176,8	2,3	0,78	0,48	0,40	0,29	0,21	0,18	0,10	0,012
190,5	2,2	0,78	0,50	0,43	0,30	0,22	0,19	0,12	0,015
204,1	2,1	0,78	0,53	0,46	0,32	0,24	0,21	0,14	0,011 9

Tabela 134. Coeficienții de repartiție ai alcanilor într-un țitei cu greutatea moleculară 240, la temperatura 48,88°C

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
1,020	250	43	13	5,7	4,5	1,8	1,5	0,62	0,029
1,361	196	32	10	4,0	3,3	1,3	1,1	0,47	0,022
1,701	154	25	7,9	3,5	2,7	1,1	0,91	0,38	0,018
2,041	132	21	6,6	2,9	2,3	0,91	0,76	0,32	0,015
2,722	98	16	5,0	2,2	1,7	0,70	0,59	0,24	0,012
3,402	77	13	4,0	1,8	1,4	0,56	0,48	0,20	0,009 6
4,082	64	11	3,4	1,5	1,2	0,48	0,40	0,17	0,008 2
4,762	58	9,2	2,9	1,4	1,0	0,42	0,35	0,15	0,007 2
5,432	48	8,0	2,6	1,2	0,91	0,37	0,31	0,13	0,006 4
6,123	43	7,2	2,3	1,1	0,82	0,33	0,28	0,12	0,005 9
6,804	38	6,6	2,1	1,0	0,75	0,30	0,26	0,11	0,004 4
8,16	37	5,5	1,8	0,86	0,64	0,26	0,22	0,093	0,004 7
9,52	27	4,8	1,5	0,76	0,56	0,23	0,19	0,082	0,004 2
10,88	23	4,2	1,4	0,68	0,50	0,21	0,17	0,074	0,004 8
12,24	21	3,8	1,2	0,63	0,46	0,19	0,16	0,068	0,003 5
13,61	19	3,4	1,1	0,58	0,42	0,18	0,15	0,063	0,003 3
17,01	16	2,8	0,94	0,50	0,36	0,15	0,13	0,054	0,002 9
20,41	13	2,4	0,81	0,44	0,32	0,14	0,11	0,048	0,002 6
23,81	11	2,1	0,72	0,40	0,29	0,13	0,11	0,044	0,002 4
27,22	9,7	1,9	0,66	0,37	0,23	0,12	0,10	0,041	0,002 3
34,02	7,9	1,6	0,56	0,33	0,24	0,11	0,096	0,038	0,002 2
40,82	6,8	1,4	0,51	0,30	0,22	0,11	0,093	0,037	0,002 2
47,62	5,8	1,3	0,48	0,29	0,21	0,11	0,092	0,037	0,002 2
54,32	5,2	1,2	0,46	0,29	0,20	0,11	0,093	0,039	0,002 3
61,23	4,7	1,1	0,45	0,28	0,20	0,11	0,094	0,041	0,002 4
68,04	4,4	1,1	0,44	0,28	0,20	0,11	0,098	0,043	0,002 6
81,60	3,7	1,0	0,44	0,29	0,21	0,12	0,10	0,049	0,003 0
95,20	3,4	0,96	0,44	0,30	0,22	0,13	0,11	0,055	0,003 7
108,8	3,1	0,92	0,45	0,32	0,23	0,15	0,12	0,062	0,004 6
122,4	2,8	0,88	0,45	0,34	0,24	0,16	0,13	0,070	0,005 8
136,1	2,6	0,86	0,47	0,36	0,26	0,18	0,15	0,080	0,007 3
159,7	2,5	0,84	0,48	0,38	0,27	0,19	0,16	0,092	0,009 0
163,2	2,4	0,83	0,50	0,40	0,29	0,21	0,18	0,10	0,010
176,8	2,3	0,82	0,52	0,43	0,31	0,23	0,19	0,12	0,014
190,5	2,2	0,81	0,54	0,45	0,33	0,24	0,21	0,13	0,017
204,1	2,1	0,80	0,56	0,48	0,35	0,26	0,23	0,15	0,021

Tabela 135. Coeficienții de repartiție ai alcanilor într-un țitei cu greutatea moleculară 240, la temperatura + 60,0°C

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
1,020	267	49	16	7,2	5,7	2,4	2,1	0,86	0,042
1,361	202	36	12	5,4	4,3	1,8	1,6	0,65	0,032
1,701	158	29	9,6	4,4	3,4	1,5	1,7	0,52	0,026
2,041	134	24	8,0	3,7	2,9	1,2	1,1	0,44	0,022
2,722	101	18	6,0	2,8	2,2	0,94	0,82	0,34	0,017
3,402	79	14	4,9	2,3	1,8	0,76	0,66	0,37	0,014
4,082	65	12	4,1	1,9	1,5	0,64	0,56	0,23	0,012
4,762	58	10	3,6	1,7	1,3	0,56	0,49	0,20	0,010
5,432	49	9,0	2,1	1,5	1,2	0,50	0,44	0,18	0,009 4
6,123	44	8,0	2,8	1,3	1,0	0,45	0,39	0,16	0,008 6
6,804	39	2,2	2,5	1,2	0,96	0,42	0,35	0,15	0,007 8
8,16	33	6,6	2,2	1,1	0,81	0,35	0,30	0,13	0,006 8
9,52	28	5,1	1,9	0,93	0,71	0,31	0,26	0,11	0,006 0
10,88	24	4,6	1,7	0,84	0,64	0,20	0,23	0,10	0,005 5
12,24	22	4,2	1,5	0,76	0,58	0,25	0,21	0,094	0,005 1
13,61	20	3,8	1,4	0,70	0,53	0,24	0,20	0,087	0,004 7

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE SISTEMELOR FLUIDE

341

Tabela 135 (continuare)

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
17,01	16	3,1	1,1	0,60	0,45	0,20	0,17	0,074	0,004 1
20,41	13	2,7	1,0	0,53	0,40	0,18	0,15	0,066	0,003 7
23,81	11	2,4	0,88	0,48	0,38	0,17	0,14	0,060	0,003 4
27,22	9,9	2,1	0,80	0,44	0,33	0,16	0,13	0,057	0,003 2
34,02	8,1	1,8	0,69	0,39	0,29	0,14	0,12	0,052	0,003 0
40,82	7,0	1,6	0,62	0,36	0,27	0,14	0,12	0,050	0,003 0
47,62	5,9	1,4	0,58	0,34	0,25	0,13	0,11	0,050	0,003 0
54,32	5,3	1,3	0,55	0,33	0,25	0,13	0,11	0,050	0,003 0
61,23	4,8	1,2	0,53	0,33	0,24	0,13	0,11	0,052	0,003 1
68,04	4,5	1,2	0,51	0,32	0,24	0,14	0,12	0,054	0,003 3
81,60	3,8	1,00	0,50	0,33	0,24	0,15	0,13	0,060	0,003 8
95,20	3,4	1,00	0,49	0,34	0,25	0,16	0,14	0,068	0,004 5
108,8	2,1	0,98	0,49	0,36	0,26	0,17	0,15	0,074	0,005 8
122,4	2,9	0,94	0,50	0,38	0,27	0,18	0,16	0,080	0,007 0
136,1	2,7	0,90	0,51	0,40	0,29	0,20	0,17	0,081	0,008 5
159,7	2,5	0,88	0,52	0,42	0,30	0,22	0,18	0,10	0,010
163,2	2,4	0,86	0,53	0,43	0,32	0,23	0,19	0,11	0,012
176,8	2,3	0,85	0,54	0,46	0,34	0,24	0,21	0,13	0,015
190,5	2,2	0,84	0,56	0,48	0,35	0,26	0,23	0,14	0,018
204,1	2,1	0,83	0,58	0,51	0,37	0,28	0,25	0,16	0,023

Tabela 136. Coeficienții de repartiție ai alcanilor într-un țieci cu greutatea moleculară 240 la temperatura 71,11 °C

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
1,020	274	54	19	8,9	7,0	3,2	2,8	1,2	0,062
1,361	207	40	14	6,6	5,3	2,4	2,1	0,37	0,047
1,701	162	32	11	5,4	4,5	1,9	1,7	0,70	0,038
2,041	136	27	9,3	4,5	3,6	1,6	1,4	0,60	0,032
2,722	103	20	7,0	3,4	2,7	1,2	1,1	0,45	0,024
3,402	81	16	5,7	2,8	2,2	1,0	0,88	0,37	0,020
4,082	66	13	4,8	2,4	1,9	0,85	0,75	0,31	0,017
4,762	59	11	4,2	2,1	1,6	0,74	0,65	0,27	0,015
5,432	50	10	3,2	1,8	1,4	0,65	0,58	0,24	0,013
6,123	44	9,0	3,3	1,7	1,3	0,59	0,52	0,22	0,012
6,804	40	8,0	3,0	1,5	1,2	0,54	0,47	0,20	0,011
8,16	33	6,8	2,5	1,3	1,00	0,46	0,40	0,17	0,009 3
9,52	28	5,9	2,2	1,2	0,88	0,40	0,35	0,15	0,008 3
10,88	24	5,2	2,0	1,0	0,80	0,36	0,31	0,13	0,007 5
12,24	22	4,7	1,8	0,94	0,72	0,33	0,28	0,12	0,006 9
13,61	20	4,3	1,6	0,86	0,66	0,31	0,26	0,11	0,006 4
17,01	16	3,5	1,4	0,73	0,55	0,26	0,22	0,098	0,005 5
20,41	13	3,0	1,2	0,64	0,48	0,23	0,20	0,086	0,005 0
23,81	12	2,6	1,0	0,58	0,43	0,21	0,18	0,079	0,004 6
27,22	10	2,3	0,94	0,53	0,40	0,20	0,17	0,072	0,004 3
34,02	8,2	2,0	0,80	0,47	0,35	0,18	0,15	0,067	0,004 0
40,82	7,1	1,7	0,72	0,43	0,32	0,17	0,14	0,064	0,003 9
47,62	6,0	1,6	0,66	0,40	0,30	0,16	0,13	0,062	0,003 8
54,32	5,9	1,5	0,62	0,39	0,29	0,15	0,13	0,062	0,003 9
61,23	5,4	1,4	0,60	0,38	0,28	0,15	0,14	0,064	0,004 0
68,04	4,5	1,3	0,58	0,37	0,28	0,16	0,14	0,066	0,004 1
81,60	3,9	1,2	0,56	0,37	0,27	0,17	0,15	0,072	0,004 7
95,20	3,4	1,1	0,55	0,38	0,28	0,18	0,16	0,080	0,005 5
108,8	3,2	1,0	0,55	0,39	0,29	0,19	0,17	0,088	0,006 6
122,4	2,9	0,99	0,55	0,41	0,30	0,20	0,18	0,096	0,008 0
136,1	2,7	0,96	0,56	0,42	0,31	0,22	0,19	0,10	0,010
159,7	2,5	0,92	0,56	0,44	0,33	0,23	0,20	0,12	0,012
163,2	2,4	0,90	0,57	0,47	0,34	0,25	0,22	0,13	0,015
176,8	2,3	0,88	0,58	0,49	0,36	0,26	0,23	0,14	0,017
190,5	2,2	0,86	0,59	0,51	0,37	0,27	0,24	0,16	0,020
204,1	2,1	0,85	0,60	0,53	0,39	0,29	0,26	0,18	0,024

Tabela 137. Coeficienții de repartitie ai alcanilor într-un țiței cu greutatea moleculară 240, la temperatura de + 82,22°C

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
1,020	280	62	22	11	8,6	4,0	3,6	1,5	0,085
1,361	211	46	17	8,1	6,4	3,0	2,7	1,1	0,064
1,701	164	37	13	6,5	5,2	2,5	2,2	0,02	0,052
2,041	132	30	11	5,5	4,3	2,1	1,8	0,77	0,043
2,722	105	22	8,3	4,2	3,3	1,6	1,4	0,59	0,033
3,402	82	18	6,6	3,4	2,7	1,3	1,1	0,48	0,027
4,082	67	15	5,6	2,9	2,2	1,1	0,97	0,41	0,023
4,762	59	13	4,8	2,5	2,0	0,93	0,84	0,33	0,026
5,432	51	11	4,2	2,2	1,7	0,83	0,74	0,32	0,017
6,123	45	10	3,8	2,0	1,6	0,76	0,67	0,29	0,016
6,804	41	9,2	3,5	1,8	1,4	0,68	0,61	0,26	0,014
8,16	34	7,7	2,9	1,5	1,2	0,58	0,52	0,22	0,012
9,52	29	6,6	2,6	1,3	1,1	0,51	0,45	0,19	0,011
10,88	25	5,9	2,3	1,2	0,96	0,46	0,40	0,17	0,010
12,24	22	5,2	2,1	1,1	0,88	0,41	0,36	0,16	0,009 0
13,61	20	4,7	1,9	1,0	0,80	0,38	0,33	0,15	0,008 4
17,01	17	3,8	1,6	0,85	0,68	0,32	0,28	0,13	0,007 3
20,41	14	3,3	1,4	0,74	0,59	0,28	0,25	0,11	0,006 5
23,81	12	2,9	1,2	0,68	0,53	0,26	0,22	0,10	0,006 0
27,22	10	2,6	1,1	0,62	0,48	0,24	0,20	0,094	0,005 7
32,02	8,3	2,2	0,92	0,55	0,42	0,21	0,18	0,085	0,005 2
40,82	7,2	1,9	0,82	0,50	0,38	0,20	0,17	0,080	0,005 0
47,62	6,1	1,7	0,76	0,47	0,36	0,19	0,16	0,078	0,004 9
54,32	5,5	1,6	0,70	0,45	0,34	0,18	0,16	0,078	0,004 9
61,23	5,0	1,5	0,67	0,44	0,33	0,18	0,16	0,080	0,005 0
68,04	4,6	1,4	0,64	0,43	0,32	0,18	0,16	0,082	0,005 2
81,60	3,9	1,3	0,62	0,42	0,32	0,19	0,17	0,082	0,005 6
95,20	3,5	1,2	0,61	0,43	0,32	0,20	0,18	0,094	0,006 5
108,8	3,2	1,1	0,60	0,44	0,33	0,21	0,19	0,10	0,007 8
122,4	2,9	1,1	0,60	0,45	0,34	0,22	0,20	0,11	0,009 4
136,1	2,7	1,0	0,60	0,46	0,35	0,24	0,21	0,12	0,011
159,7	2,6	0,97	0,61	0,48	0,36	0,25	0,22	0,13	0,013
163,2	2,5	0,94	0,61	0,49	0,37	0,27	0,23	0,14	0,016
176,8	2,4	0,81	0,62	0,51	0,38	0,28	0,25	0,16	0,019
190,5	2,3	0,90	0,62	0,53	0,40	0,30	0,26	0,17	0,022
204,1	2,2	0,88	0,63	0,55	0,41	0,32	0,28	0,19	0,026

Tabela 138. Coeficienții de repartitie ai alcanilor într-un țiței cu greutatea moleculară 240, la temperatura de + 93,33°C

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
1,020	285	61	26	13	10	5,2	4,5	2,0	0,11
1,361	214	51	19	9,7	7,8	4,9	3,4	1,5	0,084
1,701	168	41	15	7,8	6,3	3,1	2,8	1,2	0,067
2,041	137	34	13	6,5	5,5	2,6	2,3	1,0	0,056
2,722	107	25	9,7	4,9	4,0	2,0	1,8	0,78	0,043
3,402	83	20	7,8	4,0	3,3	1,6	1,4	0,63	0,035
4,082	68	17	6,6	3,8	2,8	1,4	1,2	0,54	0,029
4,762	60	15	5,7	3,0	2,4	1,2	1,0	0,47	0,025
5,432	52	13	5,0	2,6	2,1	1,1	0,93	0,44	0,023
6,123	45	11	4,5	2,4	1,9	0,95	0,84	0,38	0,020
6,804	41	10	4,1	2,1	1,7	0,86	0,76	0,34	0,019
8,16	34	8,6	3,5	1,8	1,5	0,74	0,64	0,29	0,016
9,52	29	7,4	3,0	1,6	1,3	0,64	0,56	0,26	0,014
10,88	25	6,5	2,7	1,4	1,2	0,58	0,50	0,23	0,013
12,24	23	5,8	2,4	1,3	1,0	0,52	0,45	0,21	0,012
13,61	21	5,2	2,2	1,2	0,97	0,48	0,41	0,19	0,011

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE SISTEMELOR FLUIDE

343

Tabela 138 (continuare)

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
17,01	17	4,3	1,8	1,0	0,80	0,40	0,34	0,16	0,009 5
20,41	14	3,6	1,6	0,88	0,70	0,35	0,30	0,14	0,008 5
23,81	12	3,1	1,4	0,79	0,62	0,31	0,27	0,13	0,007 8
27,22	10	2,8	1,2	0,72	0,57	0,29	0,25	0,12	0,007 3
34,02	8,4	2,3	1,1	0,63	0,50	0,25	0,22	0,11	0,006 7
40,82	7,2	2,0	0,94	0,57	0,45	0,23	0,20	0,10	0,006 4
47,62	6,2	1,8	0,85	0,53	0,42	0,22	0,19	0,09	0,006 2
54,32	5,6	1,7	0,79	0,50	0,40	0,21	0,18	0,09	0,006 2
61,23	5,0	1,6	0,75	0,49	0,39	0,21	0,18	0,09	0,006 2
68,04	4,6	1,5	0,72	0,48	0,38	0,21	0,18	0,09	0,006 4
81,60	4,0	1,4	0,68	0,47	0,37	0,21	0,18	0,10	0,007 0
95,20	3,5	1,3	0,66	0,47	0,37	0,22	0,19	0,11	0,008 0
108,8	3,3	1,2	0,65	0,47	0,37	0,23	0,20	0,12	0,009 3
122,4	3,0	1,1	0,64	0,48	0,37	0,24	0,21	0,13	0,011
136,1	2,7	1,0	0,64	0,49	0,38	0,26	0,22	0,14	0,013
159,7	2,6	1,0	0,64	0,50	0,39	0,27	0,24	0,15	0,015
163,2	2,5	0,98	0,64	0,52	0,40	0,29	0,25	0,16	0,018
176,8	2,4	0,94	0,65	0,54	0,41	0,30	0,26	0,17	0,021
190,5	2,3	0,92	0,65	0,55	0,42	0,32	0,27	0,18	0,025
204,1	2,2	0,90	0,66	0,57	0,44	0,34	0,29	0,20	0,029

Tabela 139. Coeficienții de repartitie ai alcanilor într-un țigui cu greutatea moleculară 240, la temperatura de + 104,4 °C

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
1,020	288	77	30	15	13	6,4	5,6	2,6	0,15
1,361	217	57	23	11	9,3	4,8	4,2	1,9	0,11
1,701	168	46	18	8,9	7,5	3,8	3,4	1,6	0,087
2,041	139	38	15	7,5	6,3	3,2	2,8	1,3	0,073
2,722	109	28	11	5,7	4,8	2,4	2,2	1,0	0,056
3,402	84	22	9,0	4,6	3,9	2,0	1,8	0,81	0,045
4,082	69	19	7,6	3,9	3,3	1,7	1,5	0,69	0,038
4,762	60	16	6,6	3,4	2,8	1,5	1,3	0,60	0,033
5,432	53	14	5,8	3,0	2,5	1,3	1,1	0,53	0,029
6,123	46	13	5,2	2,7	2,3	1,2	1,0	0,48	0,026
6,804	42	11	4,7	2,5	2,1	1,1	0,93	0,43	0,024
8,16	35	9,4	4,0	2,2	1,8	0,90	0,78	0,37	0,021
9,52	30	8,1	3,4	1,9	1,5	0,79	0,68	0,32	0,018
10,88	26	7,1	3,0	1,7	1,3	0,70	0,61	0,29	0,016
12,24	23	6,4	2,8	1,5	1,2	0,64	0,55	0,26	0,015
13,61	21	5,7	2,5	1,4	1,1	0,58	0,50	0,24	0,014
17,01	17	4,6	2,1	1,2	0,95	0,49	0,42	0,20	0,012
20,41	14	3,9	1,8	1,0	0,83	0,42	0,36	0,18	0,010
23,81	12	3,4	1,6	0,91	0,73	0,38	0,32	0,16	0,009 5
27,22	11	3,0	1,4	0,83	0,67	0,34	0,29	0,15	0,008 9
34,02	8,5	2,5	1,2	0,71	0,58	0,30	0,25	0,13	0,008 0
40,82	7,3	2,2	1,1	0,64	0,52	0,27	0,24	0,12	0,007 6
47,62	6,3	2,0	0,96	0,60	0,48	0,26	0,22	0,12	0,007 4
54,32	5,7	1,8	0,88	0,56	0,45	0,25	0,21	0,11	0,007 3
61,23	5,1	1,7	0,83	0,54	0,44	0,24	0,21	0,11	0,007 3
68,04	4,7	1,6	0,79	0,53	0,43	0,24	0,21	0,11	0,007 5
81,60	4,0	1,5	0,74	0,51	0,41	0,24	0,21	0,12	0,008 2
95,20	3,6	1,4	0,72	0,51	0,40	0,25	0,22	0,13	0,009 2
108,8	3,3	1,2	0,70	0,51	0,40	0,26	0,23	0,13	0,010
122,4	3,0	1,2	0,70	0,51	0,41	0,27	0,24	0,14	0,012
136,1	2,8	1,1	0,69	0,52	0,41	0,28	0,25	0,15	0,014
159,7	2,6	1,1	0,69	0,53	0,42	0,29	0,26	0,16	0,017
163,2	2,5	1,0	0,69	0,55	0,43	0,31	0,27	0,17	0,020
176,8	2,4	0,99	0,69	0,56	0,44	0,33	0,28	0,19	0,023
190,5	2,3	0,96	0,69	0,57	0,45	0,34	0,29	0,20	0,028
204,1	2,2	0,94	0,69	0,59	0,46	0,36	0,31	0,21	0,032

Tabela 140. Coeficienții de repartiție ai alcanilor într-un țiței cu greutatea moleculară 240, la temperatura + 115,56°C

P, ata	Metan	Etan	Propan	Butani		Pentani		Hexani	Heptani și super.
				Izo.	Norm.	Izo.	Norm.		
1,020	290	85	36	18	14	7,8	6,8	3,2	0,19
1,361	220	63	26	14	11	5,9	5,3	2,4	0,14
1,701	170	51	21	11	8,8	4,7	4,2	1,9	0,11
2,041	140	42	17	9,0	7,4	3,9	3,5	1,6	0,095
2,722	110	31	13	6,8	5,6	3,0	2,7	1,2	0,072
3,402	85	25	10	5,5	4,5	2,4	2,2	1,0	0,058
4,082	70	21	8,7	4,7	3,8	2,0	1,8	0,86	0,049
4,762	60	18	7,5	4,0	3,3	1,8	1,6	0,74	0,043
5,432	54	16	6,6	3,6	2,9	1,6	1,4	0,68	0,038
6,123	46	14	5,9	3,2	2,6	1,4	1,3	0,59	0,034
6,804	42	12	5,3	2,9	2,4	1,3	1,1	0,54	0,031
8,16	35	10	4,5	2,5	2,0	1,1	0,96	0,46	0,027
9,52	30	8,9	3,9	2,2	1,8	0,95	0,84	0,40	0,023
10,88	28	7,8	3,5	1,9	1,6	0,84	0,74	0,36	0,021
12,24	23	7,0	3,1	1,7	1,4	0,76	0,67	0,32	0,019
13,61	21	6,3	2,8	1,6	1,3	0,69	0,61	0,29	0,018
17,01	17	5,0	2,3	1,3	1,1	0,58	0,51	0,25	0,015
20,41	14	4,3	2,0	1,2	0,95	0,50	0,44	0,22	0,013
23,81	12	3,7	1,8	1,0	0,84	0,44	0,39	0,20	0,012
27,22	11	3,3	1,6	0,94	0,76	0,40	0,35	0,18	0,011
34,02	8,6	2,7	1,3	0,81	0,65	0,35	0,30	0,16	0,009 9
40,82	7,3	2,4	1,2	0,72	0,58	0,32	0,28	0,14	0,009 2
47,62	6,4	2,1	1,1	0,66	0,54	0,30	0,26	0,13	0,008 8
54,32	5,7	1,9	0,98	0,62	0,51	0,29	0,25	0,13	0,008 6
61,23	5,1	1,8	0,92	0,59	0,49	0,28	0,24	0,13	0,008 6
68,04	4,7	1,7	0,88	0,57	0,47	0,28	0,24	0,13	0,008 8
81,60	4,0	1,5	0,82	0,55	0,45	0,27	0,24	0,14	0,089 5
95,20	3,6	1,4	0,79	0,54	0,44	0,28	0,24	0,14	0,011
108,8	3,3	1,3	0,77	0,54	0,44	0,29	0,25	0,15	0,012
122,4	3,0	1,2	0,76	0,55	0,44	0,30	0,26	0,16	0,014
136,1	2,8	1,2	0,74	0,55	0,44	0,31	0,27	0,17	0,017
159,7	2,6	1,1	0,74	0,55	0,45	0,32	0,28	0,18	0,019
163,2	2,5	1,1	0,73	0,56	0,46	0,33	0,29	0,19	0,022
176,8	2,4	1,0	0,73	0,57	0,47	0,35	0,30	0,20	0,026
190,5	2,3	1,0	0,73	0,59	0,48	0,36	0,31	0,27	0,036
204,1	2,2	0,98	0,72	0,60	0,49	0,38	0,33	0,23	0,038

Coeficienții medii de solubilitate, între presiunea P și 1 at, sînt, în general, de 0,3–0,8 m³N gaze/m³ țiței, cu

$$\alpha = \frac{V_{og}}{V_t} \cdot (P - 1) \dots (182),$$

unde:

V_{og} este volumul de gaze dizolvate, în m³N;

V_t — volumul de țiței — solvent V , în m³.

Coeficientul «instantaneu» de solubilitate este $\alpha_1 = \frac{1}{V_t} \frac{\partial V_{go}}{\partial P}$ și are valori care pot ieși

din acest interval, îndeosebi peste limita superioară, în gama presiunilor joase, din cauza menționată, sau în gama apropiată de punctul critic, unde solubilitățile reciproce ale fazelor tind către ∞ (v. fig. 148, 149 și 150).

Pentru determinări aproximative, în cazul unui gaz sărac, la presiunile din abscisă și temperaturile corespunzătoare lor pe baza: grad $P \approx 0,12$ kg/m³ și grad $T \approx 0,033^\circ\text{C/m}$, solubilitatea în țițeiuri de diferite densități poate fi dedusă din diagrama reprezentată în fig. 151, iar în cazul unui gaz de compoziție

oarecare, din nomograma din fig. 153 în funcție de presiune și temperatură.

Prin intrarea în soluție a gazelor, greutatea specifică a fazei lichide se reduce. Pentru determinarea ușoară a acestei variații, s-a recurs la noțiunea de densitate aparentă în stare lichidă, a gazelor respective, definită ca densitatea pe care ar avea-o un lichid ipotetic care, amestecat în aceleași proporții (în greutate) și în condiții de aditivitate ideală a volumelor, ar produce aceeași variație a greutateii specifice a solventului.

În fig. 152 este redată această «densitate aparentă în stare lichidă» pentru metan și etan care ar intra în soluție într-un țiței mixt, redusă la condițiile normale pentru diferite rații de soluție.

— Coeficientul de volum al fazei lichide, b , definit ca raportul dintre volumul ocupat în condiții de zăcămint (presiune, temperatură, saturație cu gaze dizolvate) și în condițiile de suprafață, de o aceeași cantitate de țiței, este o mărime supraunitară din cauza prevalenței creșterii volumului lichidului în condițiile de zăcămint (dilatate termică și absorbtivă).

de fracțiuni ușoare) asupra scăderii volumului în aceleași condiții (compresibilitate elastică). El este necesar atât în probleme de curgere și de bilanț material, în ultimele, cunoașterea lui cu o eroare relativă de cel mult 10^{-3} fiind

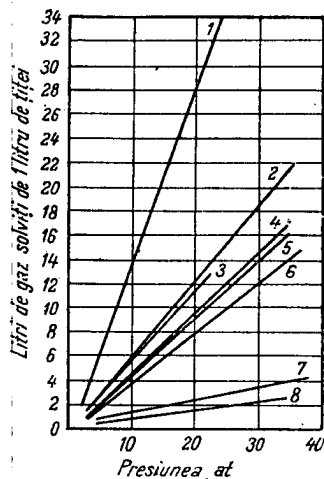


Fig. 148. Solubilitatea citorva gaze în unele țiteiuri (după GINI)

1 — CO_2 în țitei cu $d_4^{20} = 0,880$; 2 — gaz bogat în țitei cu $d_4^{20} = 0,845$; 3 — gaz sărac în țitei cu $d_4^{20} = 0,802$; 4 — gaz bogat în țitei cu $d_4^{20} = 0,880$; 5 — gaz sărac în țitei cu $d_4^{20} = 0,866$; 6 — gaz sărac în țitei cu $d_4^{20} = 0,880$; 7 — aer în țitei cu $d_4^{20} = 0,880$; 8 — hidrogen în țitei cu $d_4^{20} = 0,880$. Solubilitatea este exprimată prin rația de soluție: $\text{m}^3 \text{N}$ gaz dizolvat într-un $\text{m}^3 \text{N}$ țitei.

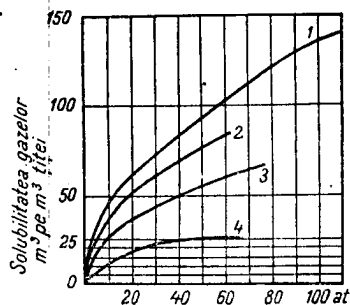


Fig. 149. Solubilitatea gazelor în țiteiuri cu diferite densități, curbele de degajare:

1 — în țiteiuri cu densitatea $d_4^{20} = 0,729$; 2 — în țiteiuri cu densitatea $d_4^{20} = 0,804$; 3 — în țiteiuri cu densitatea $d_4^{20} = 0,811$; 4 — în țiteiuri cu densitatea $d_4^{20} = 0,850$. Solubilitatea este exprimată prin rația de soluție: $\text{m}^3 \text{N}$ gaz degajat dintr-un m^3 țitei final.

imperios necesară pentru o analiză a comportării pe termen scurt (de obicei în faza inițială a exploatării, (v. Cap. V și Cap. VI). Din această cauză precum și din cauză că el depinde

de un număr mare de parametri independenți (presiune, temperatură, compoziția gazelor capabile de a intra în soluție și compoziția fazei lichide remanente în condiții de suprafață), se impune determinarea lui îngrijită pe cale experimentală ori de câte ori nu se prezintă o imposibilitate materială. Pentru această ultimă eventualitate și cu rezerva corespunzătoare în ce privește valabilitatea concluziilor ce decurg din folosirea valorilor calculate ale lui b , se pot folosi și metode indirecte de calcul. Una dintre metodele recente, care ține seama de natura gazelor (satisfăcător reprezentată prin densitatea lor relativă față de aer) și de natura țiteiului-solvent (satisfăcător reprezentată prin densitatea țiteiului mort; teoretic, b mai este puțin influențat și de structura componentelor țiteiului, alcani/ciclan/aromate) este cea redată prin diagrama din fig. 154, a în care,

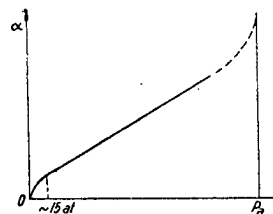


Fig. 150. Solubilitatea ipotetică a unui gaz în țitei, între presiunea atmosferică și cea critică exprimată prin rația de soluție.

conform schiței din fig. 154, b, pornindu-se de la rația de soluție (eventual determinată cu ajutorul fig. 153) și ținând seama de temperatură și caracteristicile menționate ale hidrocarburilor, se poate determina valoarea lui b .

— Coeficientul de volum bifazic, u , definit ca raportul dintre volumul ocupat în condițiile de zăcămint de o cantitate oarecare de hidrocarburi (găsită în condițiile inițiale de zăcămint, integral în stare lichidă), atât de faza lichidă cit și de cea gazoasă în condițiile (P și T) curente de exploatare, pe de o parte, și volumul țiteiului mort rezultat din aceeași cantitate inițială de hidrocarburi, după atingerea echilibrului *) în condițiile de suprafață, pe de altă parte, trebuie și el, pe cit posibil, determinat numai experimental (ca și b). Determinarea lui plecând de la valoarea calculată a lui b rămâne o soluție extremă și aproximativă:

$$u = b + B(r_0 - r_t)$$

unde, în afară de notațiile menționate,

r_0 — rația de soluție $\text{m}^3 \text{N/m}$, a fazei lichide în momentul începerii exploatării;

r_t — rația de soluție $\text{m}^3 \text{N/m}$, a fazei actuale lichide din zăcămint;

*) Valoarea lui u este puțin diferită, după cum în decursul eliberării gazelor din soluție, acest echilibru este menținut în condițiile de contact sau de diferențial, (v. Cap IV și Cap V).

B — coeficientul de volum al fazei gazoase, actual

$$B = Z \frac{T}{273} \cdot \frac{1}{P}.$$

b) Sisteme cu hidrocarburi și cu apă. Sistemele multicomponente care conțin și apă

coloane de extracție cu diametru prea mare pentru a permite înlăturarea continuă și simultană a gazelor și a apei condensate. Un alt dezavantaj al apei condensate îl constituie faptul că, deși frecvent înlăturată, apa decantată la fundul sondei acționează în mod dăunător asupra proprietăților fizice ale rocii

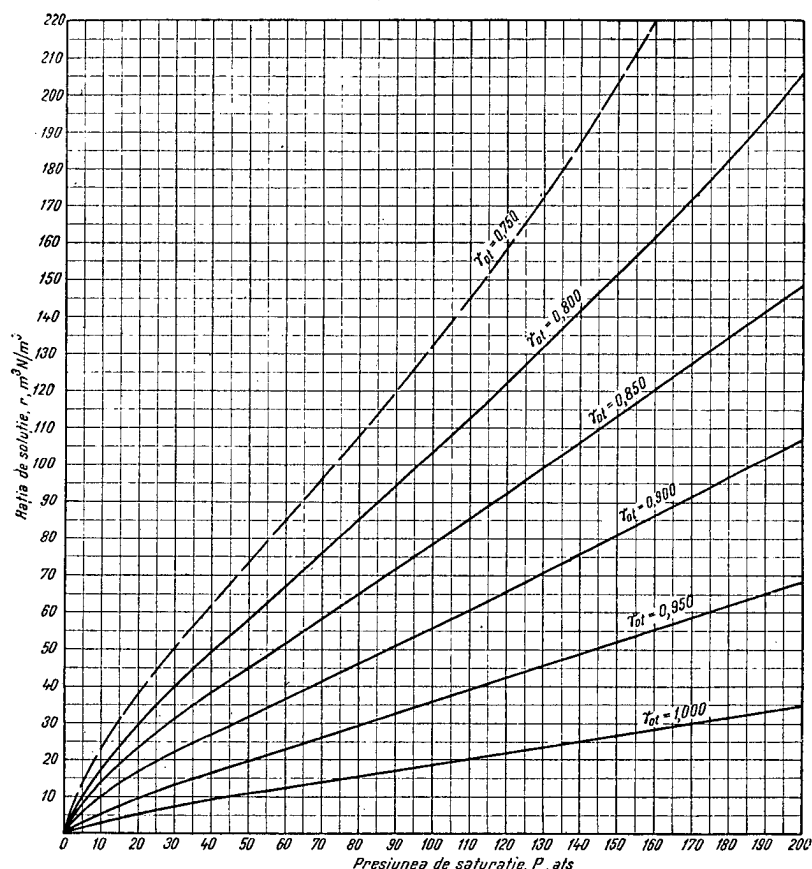


Fig. 151. Solubilitatea aproximativă a gazelor de diferite densități, în funcție de densitatea țiteiului, exprimată prin rația de soluție.

afară de hidrocarburi sînt studiate încă insuficient.

În condițiile de temperatură și de presiune din zăcămint, H_2O se găsește și în faza gazoasă, în gazele libere ale zăcămintului și în soluție, atât în faza lichidă bogată în hidrocarburi, cît și în faza lichidă bogată în apă, care conține în soluție mici cantități de hidrocarburi.

Conținutul în apă al fazei gazoase este limitat de existența efectivă a apei în zăcămint și de condițiile de temperatură și de presiune (coeficienții de echilibru respectivi).

Conținutul în apă al fazei gazoase v. și fig. 157, se manifestă dăunător la exploatarea sondelor de gaze umede prin încălzirea sondei cu apa de condensare, îndeosebi în cazul exploatării prin

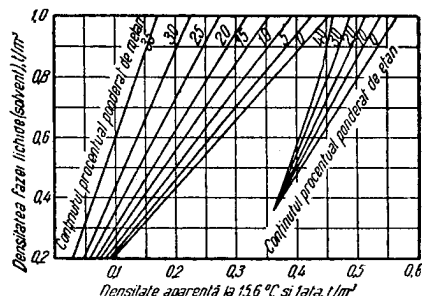
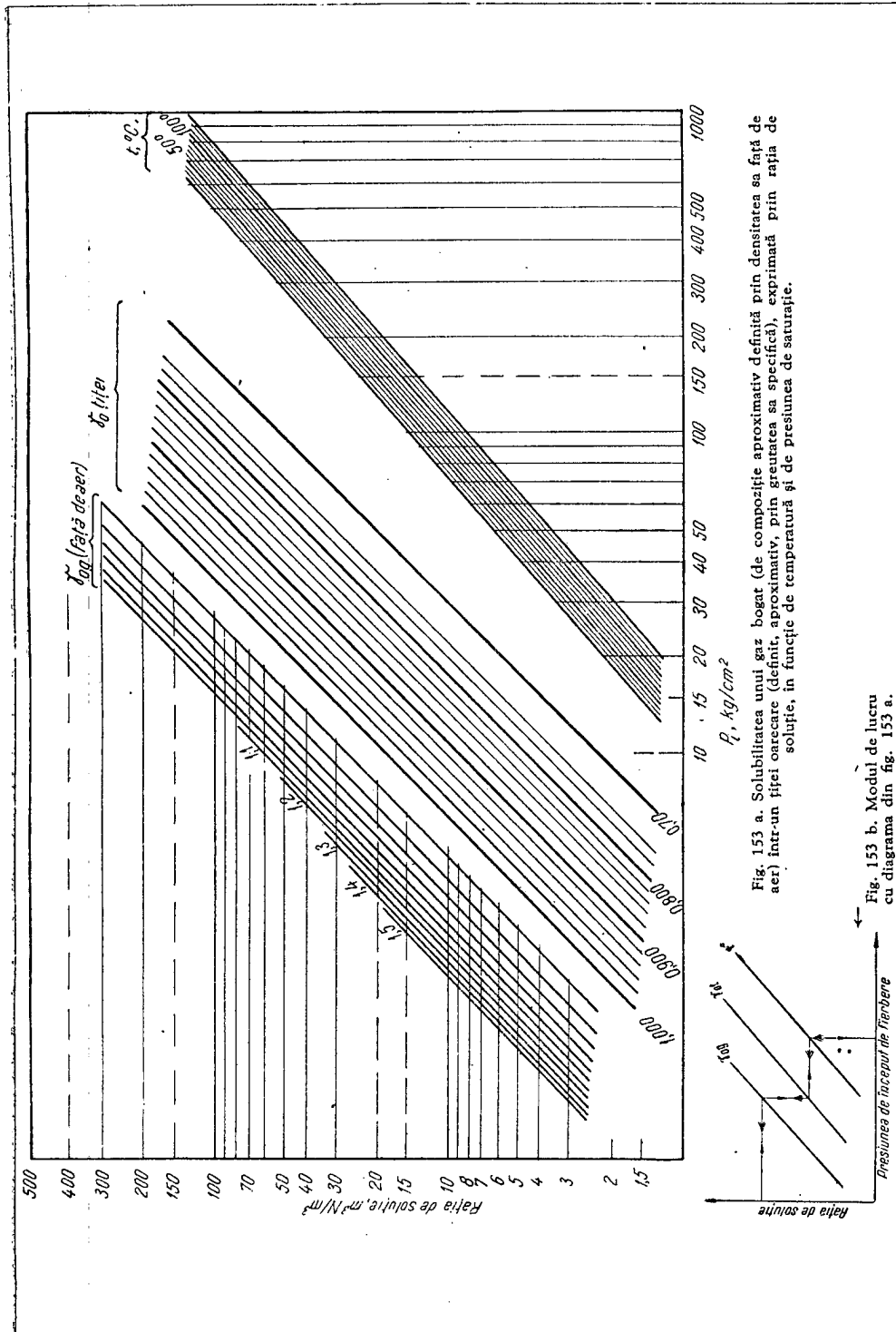
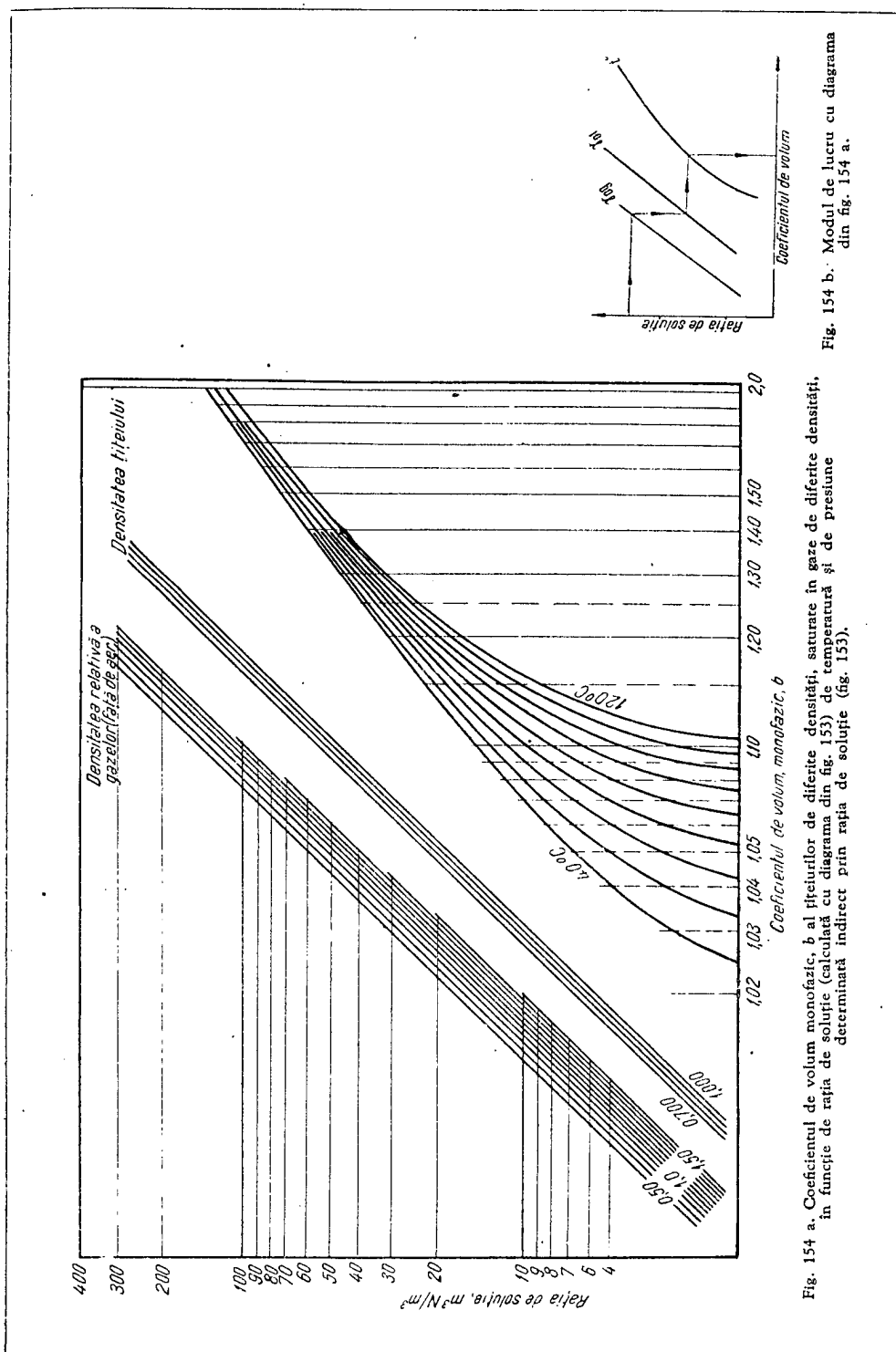


Fig. 152. Densitatea aparentă, în starea lichidă, a metanului și etanului intrate în soluție, corectată pentru dilatație termică și compresie elastică în stare lichidă, la condițiile normale.





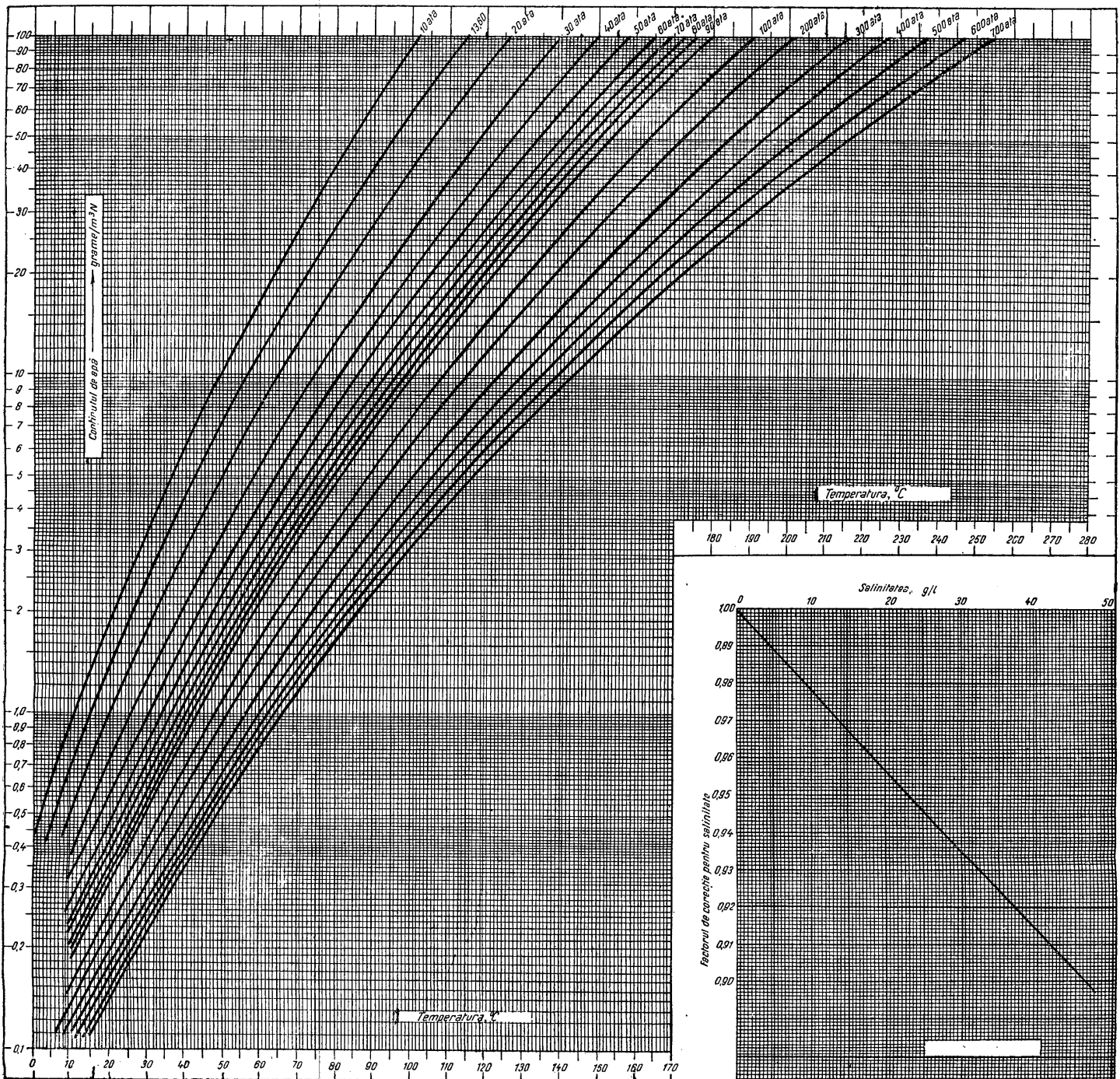
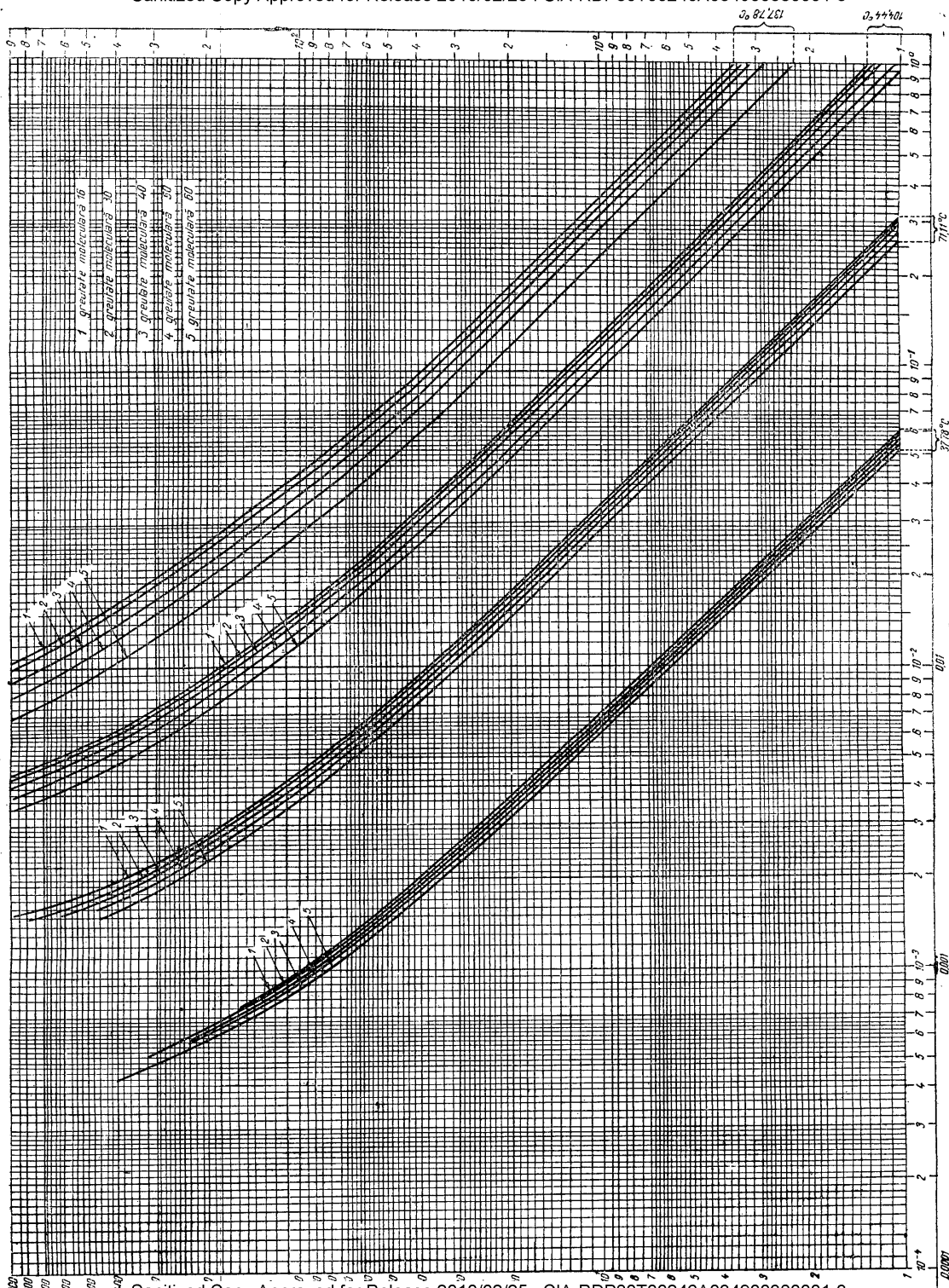


Fig. 155. Conținutul de vapori de apă al unui gaz sărac, în funcție de temperatură, de presiune și de salinitatea apei în echilibru cu gazul. Corecția pentru salinitate se deduce din diagrama mică și se aplică prin multiplicare solubilității în apă dulce. Salinitatea apei este exprimată, în fracțiune ponderală $\times 10^{-6}$ sau g/litru.



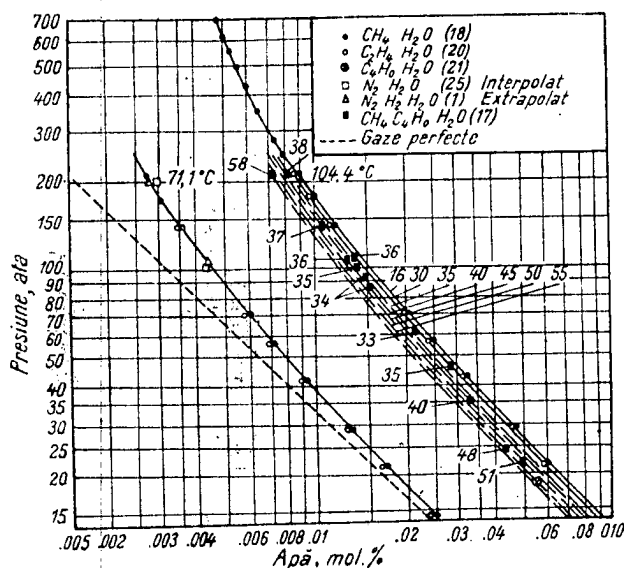


Fig. 157. Conținutul de vapori de apă al citorva gaze, în funcție de temperatură și de presiune:

- 1 — sistemul $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$; 2 — sistemul $\text{C}_2\text{H}_6 + \text{H}_2\text{O}$; 3 — sistemul $\text{C}_4\text{H}_{10} + \text{H}_2\text{O}$; 4 — sistemul $\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$; 5 — sistemul $\text{N}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$; 6 — sistemul $\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{H}_2\text{O}$; 7 — sistemul gaz perfect + H_2O .

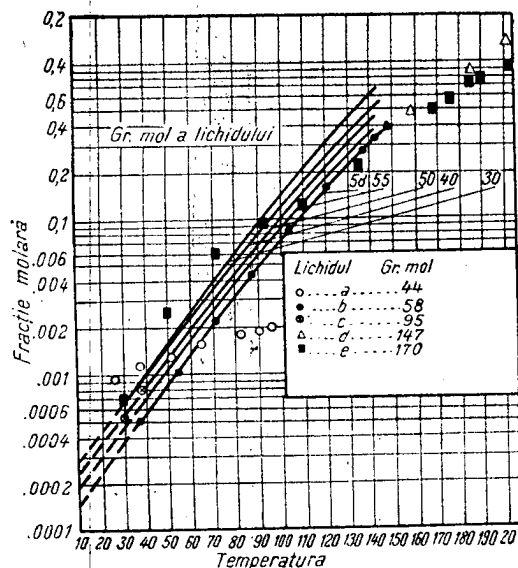


Fig. 158. Solubilitatea apei în sistemele de hidrocarburi lichide, în funcție de temperatură și de greutatea moleculară

- a — faze lichide de hidrocarburi, la presiunea de echilibru:
 a — în propan;
 b — în butan;
 c — în gazolină;
 d — în benzină;
 e — în lampant.

cifra de lângă curbe reprezintă greutatea moleculară a fazei lichide hidrocarburi.

co'ectoare (permeabilitate și rezistență mecanică).

În vecinătatea capului de erupție și mai departe în sistemul de transport al gazelor, prezența apei în mare cantitate în gaze constituie un permanent pericol de blocare prin formarea de dopuri de criohidrați în conductele de gaze recomprimate (v. Cap. X, XI și XX), în special pe vreme rece sau, mai ales la începutul dezghețului.

Deoarece calculul conținutului în apă al gazelor sub presiune, efectuat pe baza legii Raoult-Dalton nu a dat rezultate satisfăcătoare, din cauzele menționate (IV A.e), s-au efectuat determinări experimentale (v. fig. 155).

În cazul când gazul are un conținut apreciabil de componente grei, conținutul în apă se determină conform fig. 156, în funcție de greutatea moleculară a gazului.

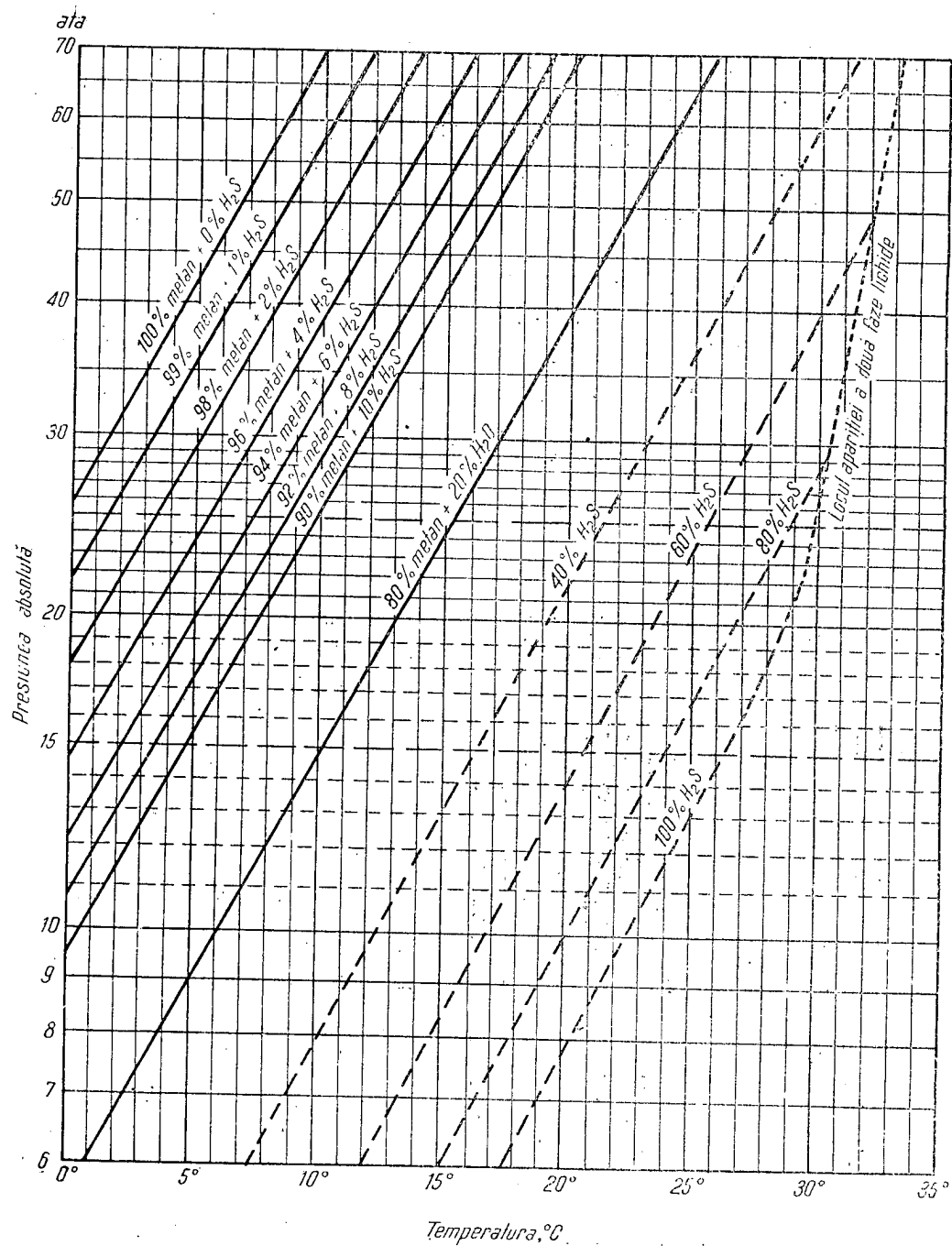
Conținutul în apă al fazei lichide de hidrocarburi este mai puțin vătămător (coroziune), fiind relativ mic. Nu se dispune de date experimentale care să permită deosebirea solubilității apelor

dulci de aceea a apelor mineralizate. Solubilitatea apei crește, în general, când scade greutatea moleculară a fazei lichide de hidrocarburi (v. fig. 158).

Solubilitatea hidrocarburilor ușoare în apă, deși mult mai mică decât în țitei, nu este neglijabilă; uneori i se atribuie un efect util în operațiile de exploatare secundară (v. fig. 159).

În realitate, compoziția de fază a sistemelor de hidrocarburi care conțin și apă este relativ complexă (v. fig. 160, sistemul metan-apă).

Se observă existența a șapte domenii de echilibru: V — faza unică vapori; H + V — vapori în echilibru cu hidrați solizi; V + L — fază vapori în echilibru cu soluție de metan în apă; H + L — hidrați solizi în echilibru cu soluție de metan în apă; L₁ — soluție nesaturată de metan în apă; L₁ + S — soluție în echilibru cu gheață; și H + I — eutectic de hidrați solizi + gheață. În practică interesează îndeosebi conținutul în apă al fazei de vapori, riscurile de condensare și de formare a criohidraților solizi fiind sporite în cazul conținuturilor mari în apă. Formarea criohidraților solizi (numiți mai puțin propriu «hidrați de gaze») este condiționată de existența unui conținut suficient de apă și de existența unei presiuni și a unei temperaturi la care criohidrații



Condițiile de apariția unei faze solide (criohidrat) în sistemul $H_2S + CH_4 + H_2O$

Fig. 158 a

să fie stabili. Se cunosc criohidrații metanului (cu șase molecule de apă), ai etanului (cu șapte molecule de apă), ai propanului (cu șapte molecule de apă) și ai izobutanului (cu șapte molecule de apă). Sistemele bifazice au diagrame de echilibru analoage celei repre-

comparația între curba (183) și comportarea reală a două gaze).

Pentru a se ține seama de influența compoziției gazului, s-au determinat experimental și s-au exprimat analitic și grafic condițiile de

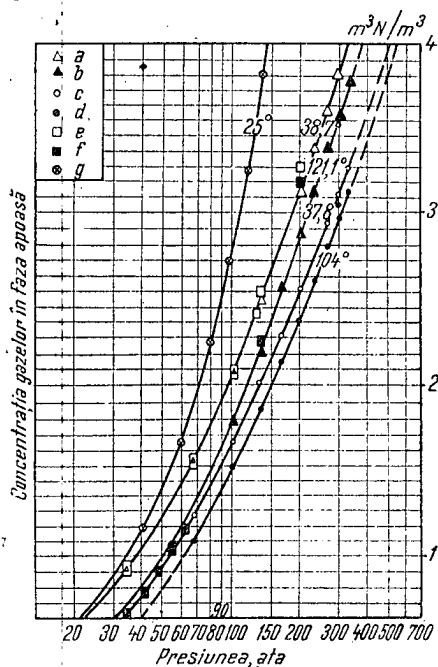


Fig. 159. Solubilitatea citorva gaze în apă, în funcție de presiune, de temperatură și de greutatea moleculară medie a gazului:

- a — 37,78 °C } gaz natural, sărac în apă dulce;
 b — 121,11 °C }
 c — 37,78 °C } gaz natural sărac, în apă sărată
 d — 93,33 °C } (34 mg/l)
 e — 37,78 °C } CH₄ + C₄H₁₀ în apă;
 f — 137,78 °C }
 g — 14 °C CH₄ în apă.

zentate în fig. 160. În fig. 161 sînt reprezentate domeniile de existență ale criohidraților, în funcție de temperatură și de presiune (domeniul trapez, de temperatură joasă), pentru alcanii puri.

Pentru hidrații gazelor cu compoziție complexă obișnuită, s-au propus diferite relații de determinare a domeniului de stabilitate, de exemplu,

$$t = 10,633 \cdot p^{0,285} - 17,78 \quad (183)$$

în care:

- t — este temperatura de formare, respectiv de topire, în °C;
 p — presiunea de formare, respectiv de topire, în ata, a cărei exactitate nu este satisfăcătoare din cauza variabilității compoziției gazelor (v. în fig. 162

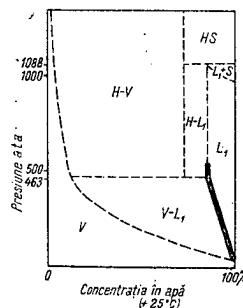


Fig. 160. Diagrama presiune-compoziție a sistemului metan + apă, la temperatura + 20 °C:

- V — regiunea de stabilitate a unei faze unice în vapori;
 H + V — regiunea de stabilitate a două faze în echilibru: — vapori + criohidrat solid;
 V + L — regiunea de stabilitate a două faze în echilibru: vapori + soluție de metan în apă lichidă;
 H + L₁ — regiunea de stabilitate a două faze în echilibru: criohidrați + soluție de metan în apă lichidă;
 L₁ — regiunea de stabilitate a unei singure faze + soluție lichidă nesaturată de metan în apă;
 L₁ + S — regiunea de stabilitate a două faze în echilibru: soluția lichidă în echilibru cu gheață;
 H + S — regiunea de stabilitate a două faze în echilibru: eutectic solid de criohidrați și gheață.

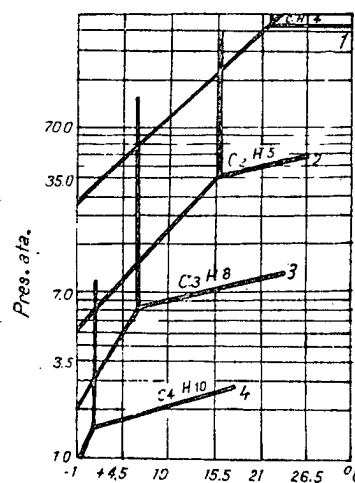


Fig. 161. Domeniul de stabilitate a criohidraților alcanilor inferiori (presiuni și temperaturi):
 1 — sistemul metan + apă; 2 — sistemul etan + apă;
 3 — sistemul propan + apă, 4 — sistemul izobutan, apă.

echilibru ale criohidraților de gaze, în funcție de densitatea gazului față de aer (v. fig. 163).

Practic, condițiile în care se formează criohidrații sînt date în fig. 164.

FIZICA ZĂCĂMINTELOR DE ȚIȚEI ȘI GAZE

Pentru a se determina detenta admisibilă fără riscul de a se forma criohidrați, s-au întocmit diagramele reprezentate în fig. 165—175, pentru gaze de diferite compoziții, în funcție de temperatura inițială.

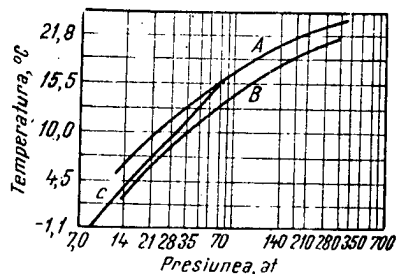


Fig. 162. Curbele (P, t) de formare a criohidraților gazelor de sondă A și B, două gaze de sondă, C — calculată după formula (183).

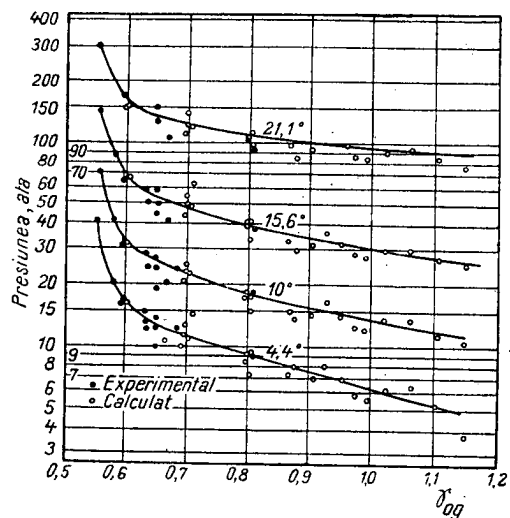


Fig. 163. Curbele presiunii de stabilitate a criohidraților în funcție de greutatea moleculară a gazului generator, la diferite temperaturi:
1 — la +4,44 °C; 2 — la +10,00 °C; 3 — la +15,56 °C; 4 — la +21,2 °C.

În cazuri excepționale (gaze cu compoziție specială), aceleași neajunsuri pot fi provocate de formarea criohidraților de hidrogen sulfurat sau de acid carbonic.

c) Studiul experimental al proprietăților fizice ale sistemelor de hidrocarburi. Studiul experimental al proprietăților fizice ale sistemelor de hidrocarburi prezintă dificultăți deosebite, datorită mai ales necesității de a efectua determinările la presiuni foarte înalte, în condiții de etanșitate perfectă (pierderile cantitative cele mai mici alterează rezultatele măsurărilor prin alterarea calitativă a probei, după cum se pierde mai mult dintr-o fază sau din cealaltă, și prin alterarea cantitativă a mări-

milor măsurate, amplificată de împrejurarea că proba analizată cuprinde ea însăși cantități reduse de substanță).

Din acest punct de vedere, organele de închidere și mai ales ferestrele de control constituie partea slabă a majorității aparatelor

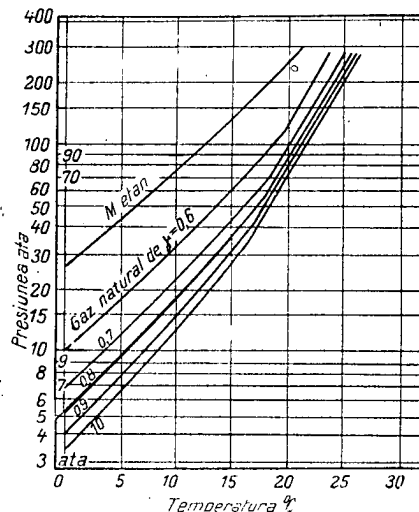


Fig. 164. Condițiile de temperatură și de presiune în care se pot forma criohidrații de gaze:
1 — metan; 2 — gaz cu densitatea față de aer de 0,6; 3 — gaz cu densitatea față de aer de 0,7; 4 — gaz cu densitatea față de aer de 0,8; 5 — gaz cu densitatea față de aer de 0,9; 6 — gaz cu densitatea față de aer de 1,0.

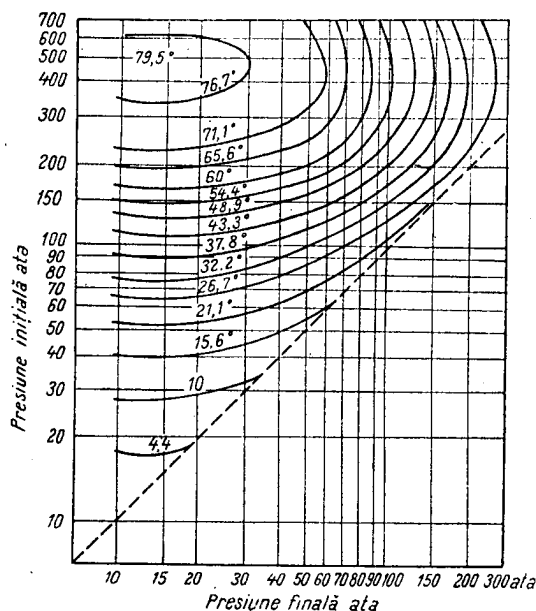


Fig. 165. Diagrama pentru determinarea condițiilor de detentă admisibilă (fără formare de criohidrați) pentru un gaz de sondă cu densitatea față de aer de 0,60 și cu greutatea moleculară medie de 17,4.

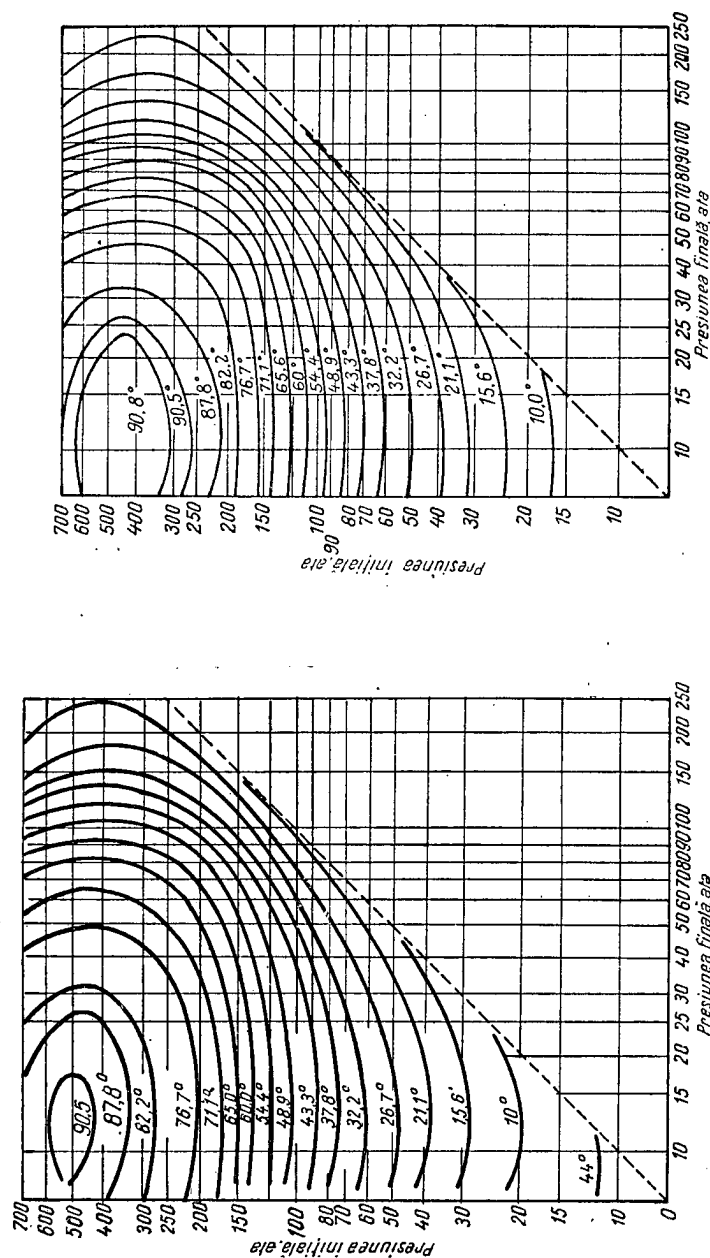


Fig. 167. Diagrama pentru determinarea condițiilor de detentă admisibilă (fără formare de criohidrați) pentru un gaz de sondă cu densitatea față de aer de 0,80 și cu greutatea moleculară medie de 28,2.

Fig. 166. Diagrama pentru determinarea condițiilor de detentă admisibilă (fără formare de criohidrați) pentru un gaz de sondă cu densitatea față de aer de 0,70 și cu greutatea moleculară medie de 20,3.

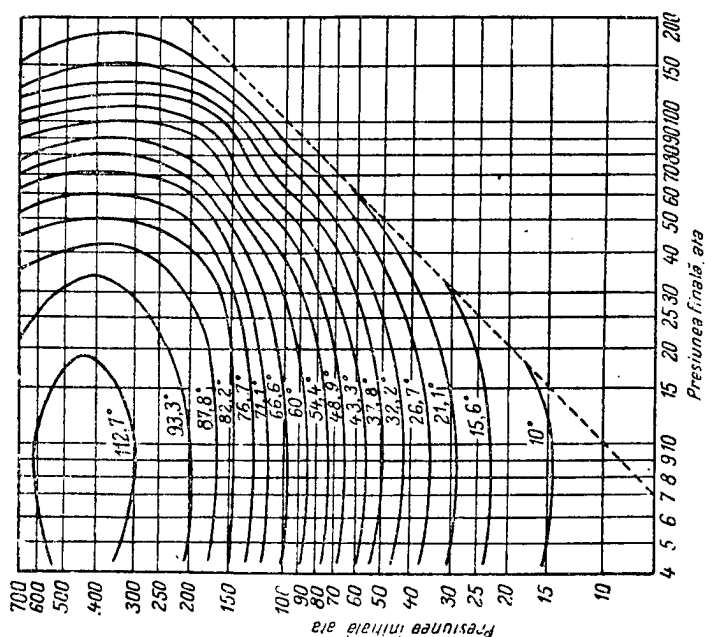


Fig. 168. Diagrama pentru determinarea condițiilor de detență admisibilă (fără formare de criohidrați) pentru un gaz de sondă cu densitatea față de aer de 0,90 și cu greutatea moleculară medie de 26,1.

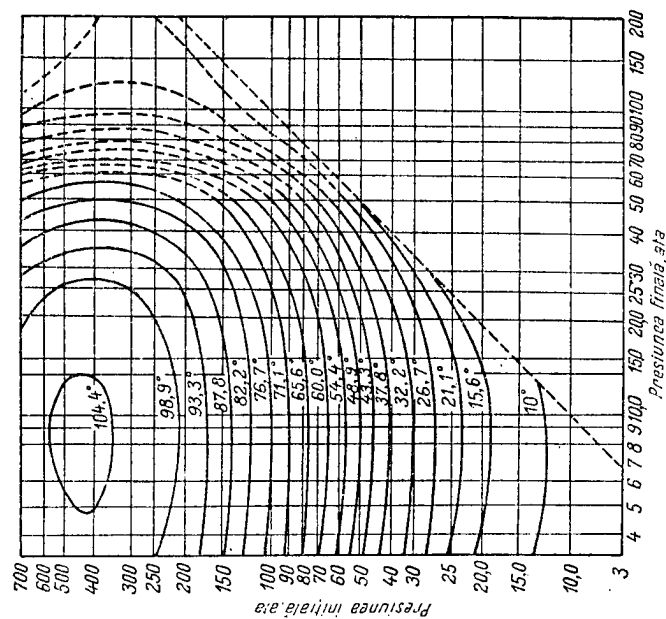


Fig. 169. Diagrama pentru determinarea condițiilor de detență admisibilă (fără formare de criohidrați) pentru un gaz de sondă cu densitatea față de aer de 1,00 și cu greutatea moleculară medie de 29,0.

de cercetare. Dificultățile sînt atît de mari, încît la majoritatea aparatelor construite în străinătate s-a renunțat la ferestrele de control. Aparatura Laboratorului Central de Cercetări Științifice al S.R.P. din Cimpina este una dintre puținele aparaturi care satisface, în condiții acceptabile, necesitatea de etanșeitate și permite (operație necesară în condițiile de exploatare) să se efectueze asupra unei singure probe, aproape simultan, toate cercetările necesare.

Din cauza dificultăților menționate, în multe cazuri s-a recurs la fragmentarea operațiilor și la specializarea aparatului. Dintre problemele mai deosebite care au determinat construirea de aparate specializate fac parte: determinarea relației $f(P, v, t)$ a amestecului gaze + țigeti, determinarea punctului critic al amestecului (în realitate, a intersecției curbei cu planul de temperatură ($t = t_{zc}$), determinarea viscozității uneia sau a ambelor faze prezente, determinarea tensiunii superficiale gaze-țigeti și a tensiunii interfaciale țigeti-apă de zăcămint etc.

O dificultate suplimentară a cercetărilor o constituie recoltarea de probe reprezentative ale sistemului fluid din zăcămint (determinări efectuate asupra materialului extras direct din carote, (v. Cap. III B.4.b) 1), și transportul probelor fără a le altera pînă în aparatul de cercetare.

1) **Recoltarea probelor.** În cazul sondelor de gaze, fără fracțiuni condensabile în condițiile din coloana de extracție, recoltarea probelor se poate face fără nici o dificultate de la capul de erupție. În general, dacă există în condițiile de coloană o fază apoasă de condensare, ea este cantitativ redusă și, în general, este fie neglijată, fie luată în considerație separat, recoltîndu-se pentru analiza principală gazul separat.

În cazul sondelor de țigeti se ivește dificultatea recoltării unei probe avînd compoziție identică cu cea produsă de strat. Scăderea de presiune și de temperatură din coloana de extracție provoacă formarea în ea a două faze, gaz și lichid (neglijînd apa). Datorită legilor curgerii unor astfel de amestecuri (v. Cap. IX) și, în special, fenomenelor de alunecare, raportul cantitativ gaz/lichid în amestecul dintr-un element al coloanei este mai mic decît raportul debitelor medii, de gaz respectiv de lichid. Alterarea raportului este cu atît mai mare, cu cît elementul de coloană considerat are o secțiune de trecere mai mare.

Din această cauză, recoltarea directă de la sabotul coloanei de extracție sau din apropierea lui poate, principal, să altereze raportul cantitativ al fazelor recoltate. Datorită însă faptului că aparatele moderne de recoltat probe lasă să treacă aproape întregul debit al coloanei de extracție prin interiorul lor, printr-o secțiune de trecere relativ mică, alterarea produsă are o importanță redusă

în cazul cînd curentul este bifazic în punctul de colectare. În cazul unui curent monofazic (toate gazele în soluție), alterarea citată nu se produce.

— Recoltarea corectă de la fund asigură, deci, o compoziție a probei practic identică cu media (ponderată cu volumul) compozițiilor fluidelor produse de diferitele fracțiuni ale stratului perforat.

— Recoltarea de la suprafață este mult mai ușoară și nu necesită aparate speciale de introdus în sonde și echipamentul corespunzător de manevră, însă cere o deosebită atenție în captarea separată a probelor recoltate din cele două faze. În cazul cînd se recoltează probe separate de gaze și de lichid, reconstituirea probei este îngreuiată de necunoașterea sau de nerealizarea proporției de recombinare (măsurarea inexactă a debitelor de gaze și de țigeti ale sondei, respectiv erori la măsurarea cantităților de probe recombinate, pierderi inegale din porțiunile recombinate etc.). Se preferă recoltarea directă de amestec, pe cît posibil la presiuni înalte, în amonte de duză, în cantitate sensibil mai mare decît cea necesară; după aducerea ei în stare monofazică, după trecerea totală a gazelor în soluție și după omogenizare, se reține cantitatea necesară din probă.

Aparatura. Pentru probele recoltate la suprafață, sînt satisfăcătoare simple recipiente tubulare, înzestrate cu robinete la ambele extremități, confecționate de preferință din material neoxidabil, umplute cu apă, pe care o elimină prin deplasare, amestecul recoltat.

Pentru probele recoltate din țevile de extracție, din apropierea sabotului, există o serie de aparate, dintre care multe sînt nesatisfăcătoare. Aparatele cu deschidere bruscă la o singură extremitate nu mai sînt folosite astăzi, din cauză că prin modul lor de lucru ele nu recoltează conservativ amestecul (recoltează în general mai multă fază gazoasă).

Aparatele cu deschidere la ambele extremități sînt mai folosite și se introduc deschise în țevile de extracție. Astfel, ele constituie un element al coloanei de extracție, care, prin închiderea bruscă la ambele extremități, la momentul dorit, asigură captarea unei probe reprezentative.

Aparatul ing. M. M. Ivanov. (Institutul din Ufa) — realizează întîrzierea comenzii de închidere, necesară pentru introducerea aparatului pînă la adîncimea dorită, prin declanșarea mecanismului de închidere de către un piston liber, greu, 18 (fig. 170), la sfîrșitul căderii lui prin cilindrul 26, umplut cu ulei de viscozitate cunoscută.

Viteza de cădere se poate regla prin alegerea unui ulei cu viscozitate potrivită și a duzei 19 care străbate pistonul, în limite de timp foarte largi, de la cîteva minute pînă la cîteva ore și, la nevoie, mai mult. Supapa cu bilă 20

permite scurtcircuitarea duzei 19 și readucerea rapidă a pistonului greu 18 în poziția inițială.

La atingerea piesei 14 de către pistonul căzut, piesele 16 și 17 eliberează tija 9, care, sub apăsarea resortului 12, se ridică, aplicând ventilul 2 pe scaunul său și, prin intermediul piesei-foarfece 6, liberează ventilul 3, care,

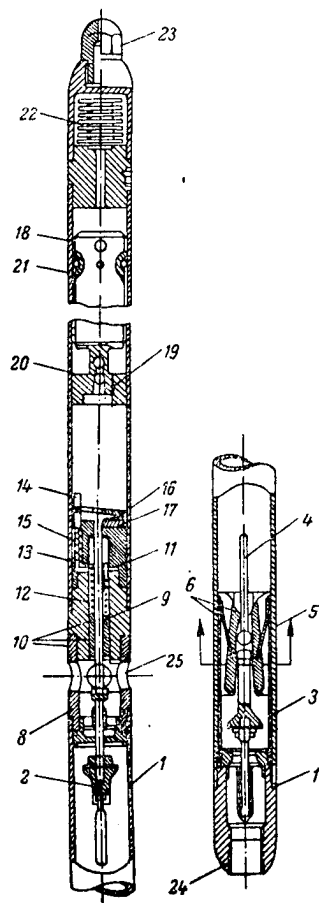


Fig. 170. Aparatul de recoltat probe de fund îng.
M. M. Ivanov — Institutul de Petrol din Ufa.

sub acțiunea resortului 7, se coboară până la scaunul său. Prin acțiunea resorturilor 12 și 7 căreia i se adaugă (pe măsura ridicării aparatului la o adâncime și la presiuni mai joase) acțiunea presiunii interioare a fluidului captat, ventilele supapelor 2 și 3 rămân închise până în momentul transvazării conținutului, când ventilul 3 poate fi deschis prin deplasarea axială în sus (sensul figurii).

Aparatul tip H al Laboratorului Central Cimpin are organele de închidere construite și situate în mod asemănător cu acelea ale aparatului Ivanov.

Deosebirea esențială o constituie dispozitivul de declanșare, care este comandat de un mecanism de ceasornic 18 (v. fig. 171), acționat de un grup de resorturi 20, cuplate în serie.

Din cauza sensibilității la șocuri a mecanismului de ceasornic, acesta este înzestrat cu suspensie prin amortizor 19. Complicația mecanismului de ceasornicărie nu constituie un inconvenient prea mare, datorită faptului că el este folosit în mod curent ca dispozitiv standard de acționare cu întârziere a diferite alte aparate introduse în gaura de sondă. Declanșarea are loc prin rotirea de către axa 16 a ceasornicului, a camei excentrice 14, care liberează piedica 13, astfel încât ventilul 2 se poate ridica sub acțiunea resortului 12 și închide. Ridicarea tijei 4 a acestui ventil lungeste axa (paralelă cu aceea a aparatului) paralelogramului articulat 5, iar prin închiderea acestuia (micșorarea axei perpendiculare pe axa aparatului), manșonul 6 este eliberat și coboară sub acțiunea resortului 7, aplicând ventilul 3 pe scaunul său.

În acest aparat, închiderea supapelor cu ventilele 2 și 3 se face independent, prin acțiunea resorturilor 7 și 12. În caz de neînchidere simultană a supapelor (rezistență accidental întâlnită de unul dintre cele două mecanisme mobile respective), se riscă o alterare a probei prin decantare parțială. În scopul asigurării simultaneității acțiunii lor, L.C.C.S. a modificat aparatul, cuplând ventilele 2 și 3 prin intermediul tijelor-cremalieri 4—5 și 6—7 (fig. 172) cu roata dințată 8. S-a realizat prin aceasta simultaneitatea acțiunii lor cu prețul unui risc sporit de blocare și de închidere neetansă (boabele de nisip care s-ar așeza fie la scaunele ventilelor 2 sau 3, fie în dinții cremalierelor, împiedică închiderea ambelor supape).

Pentru ameliorarea condițiilor de închidere, aparatul este folosit astăzi cu dispozitivele de închidere modificate. În locul supapelor cu ventil 2 și 3, la care suprafețele de etanșare se apropie prin translație după o direcție perpendiculară la suprafața de etanșare, riscând captarea boabelor de nisip chiar pe suprafața de etanșare, s-a introdus un mecanism de închidere care acționează ca un sertar: suprafețele de etanșare se apropie prin translație după o direcție paralelă cu suprafețele de etanșare, exercitând astfel și o acțiune de curățire a acestora. În poziția din fig. 172 a tijei tubulare 2 (respectiv 3), dispozitivul de deschidere este deschis, spațiul camerei 13 comunică prin orificiile 4 cu interiorul tijei 2 și acesta, prin orificiile 5, cu exteriorul aparatului (coloana de țevi de extracție). Prin translația tijei 2—3 în sensul destinderii resortului 12 (în prealabil comprimat), orificiile 4 și 5 ies (la capătul 2) din camera 13, respectiv intră (la capătul 3) în camera tubulară 13, care rămâne astfel un recipient fără comunicație cu exteriorul, captând proba.

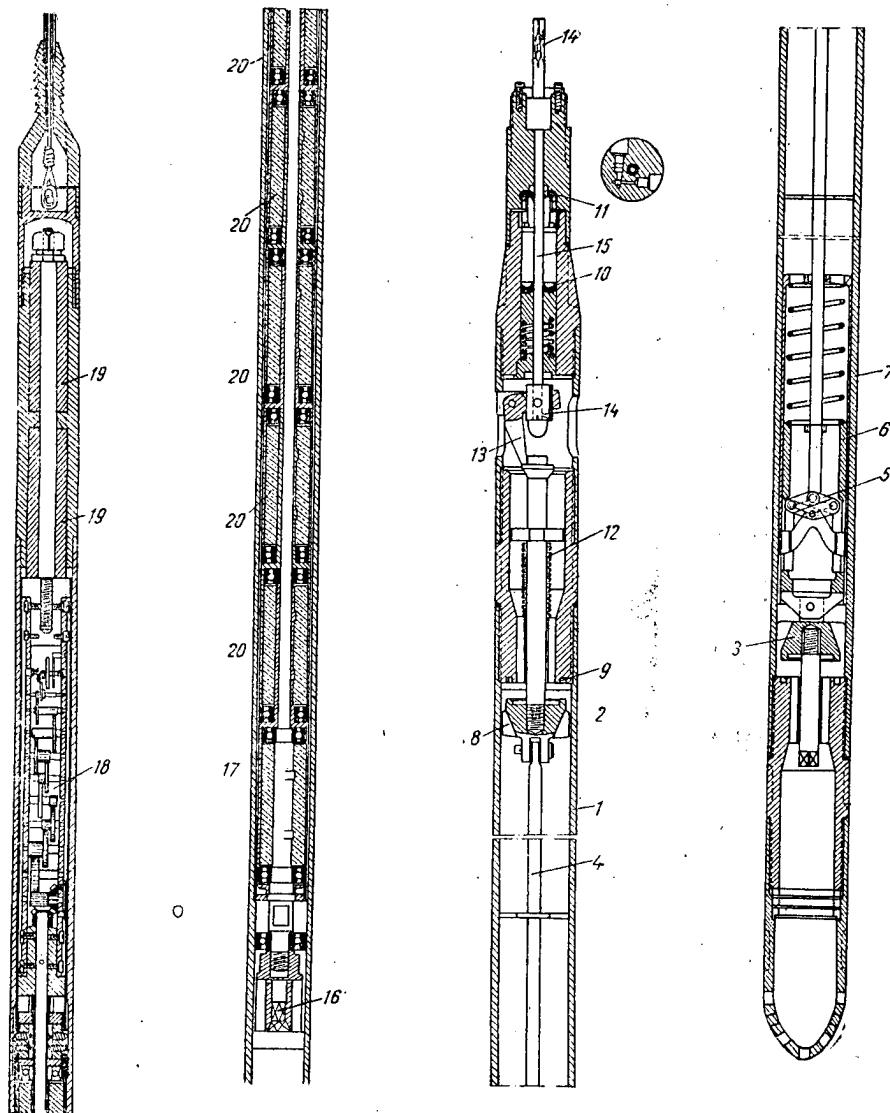
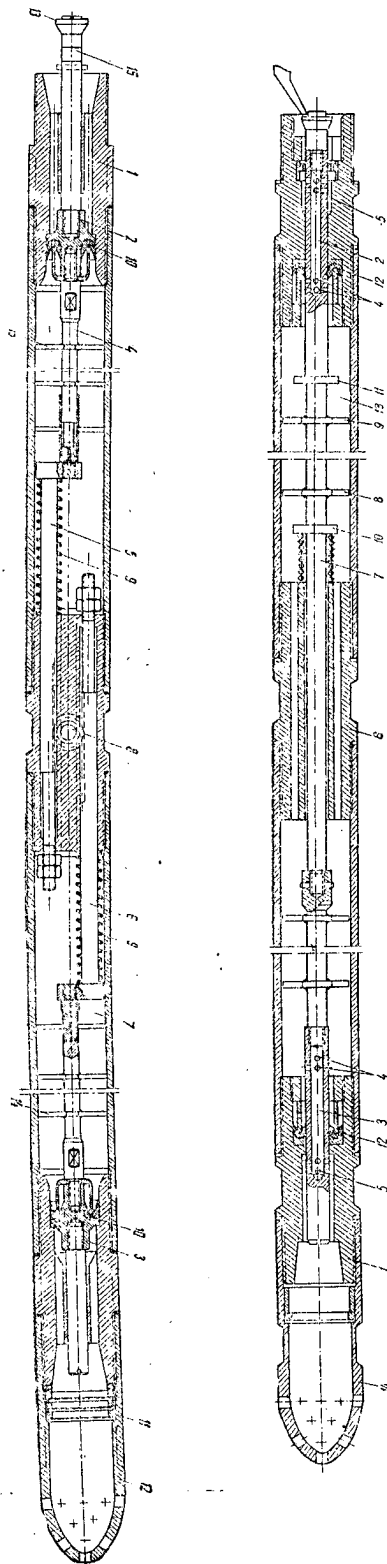


Fig. 171. Aparatul de recolat probe de fund tip H al Laboratorului Central Cimpina S.R.P.:
 1 — mantaua camerei de recolare; 2 — ventilul supapei superioare; 3 — ventilul supapei inferioare;
 4 — tija de acționare a ventilelor; 5 — paralelogram articulată; 6 — manșon de blocare; 7 — resortul
 care acționează ventilul inferior; 8 — aripă de conducere a ventilului superior; 9 — garnitura scaunului
 supapei superioare; 10 — garnitura de etanșare a tijei ceasornicului; 11 — garnitură de etanșare a tijei
 ceasornicului; 12 — resortul care acționează ventilul superior; 13 — pedica tijei 4; 14 — camă excentrică
 de acționare a pedicii 13; 15 — tija de comandă a camei 14; 16 — cuplajul tijei 15; 17 — tija
 motoare a ceasornicului; 18 — ceasornic; 19 — amortizoare de suspensie; 20 — resorturi pentru ceasornic.



Aparatura de introducere în sondă a aparatului de extras probe este cea obișnuită, troliu mic autopurtat pentru aparatele obișnuite de recoltat probe și de măsurat presiunile și temperaturile de fund, de obicei dotat cu o priză de forță (roată dințată cu lanț Galle) chiar pe una dintre roțile motoare ale autocamionetei respective (fig. 174).

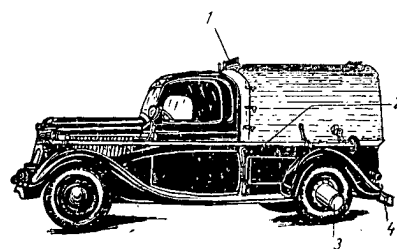


Fig. 174. Autocamionetă de 0,5 t echipată pentru măsurători de fund și pentru recoltare de probe.
1 și 2 — suport pentru manta; 3 — priză de forță;
4 — ghidaj și priză pentru contor.

Prin cuplarea cu lanțul Galle la toba sirmei de introducere, se realizează extragerea mecanizată a aparatului, introducerea făcându-se prin cădere liberă, controlată cu frâna și cu indicatorul de adâncime.

Pentru reconstituirea condițiilor de zăcămint, este necesar ca recoltarea probei să se facă numai după o perioadă de producție controlată (de preferință restrinsă) a sondei, pentru a asigura păstrarea în soluție a gazelor care în zăcămint se găsesc în această situație. În cazul cînd sonda produce și gaze libere la nivelul perforaturilor, se preferă uneori oprirea sondei pentru o scurtă perioadă de timp, în vederea restabilirii parțiale a presiunii de strat în același scop, în măsura în care lucrul poate fi realizat. În orice caz, operația recoltării trebuie asociată, în același scop, cu măsurători de temperatură și de presiuni de fund. v. și cercetarea sondelor Cap. X și XI

După recoltare se recomandă transvazarea probei în recipiente de înmagazinare (pentru a nu bloca aparatul de recoltare). După procedura folosită de L.C.C.S., se utilizează ca recipient intermediar de depozitare un reci-

Fig. 172. Modificarea dispozitivului de acționare a supapelor 2 și 3 din fig. 167:

1 — mufa de legătură; 2 — corpul ventilului superior; 3 — corpul ventilului inferior; 4 și 5 — tijele de acționare a ventilului superior; 6 și 7 — tijele de acționare a ventilului inferior; 8 — roata dințată pentru cuplarea cremalierei; 9 — resorturi de închidere a supapelor; 10 — garnitură de etanșare a supapelor; 11 — sită pentru reținerea nisipului; 12 — piesă sabot; 13 — șurub de declanșare; 14 — ghidajul supapei inferioare; 15 — ghidajul supapei superioare.

Fig. 173. Modificarea dispozitivului de închidere al aparatului de recoltat probe de fund LCCS-SRP:
1 — mufe de legătură; 2 — supapa sarter superioară (tija tubulară); 3 — supapa sarter inferioară (tija tubulară); 4 — orificii de comunicare cu interiorul tijelor 2 și 3; 5 — orificii de comunicare cu exteriorul tijelor 2 și 3; 6 — mufa de ghidaj; 7 — tija de comandă a supapelor; 8 și 9 — discuri de ghidare; 10 și 11 — gulere de limitare a cursei; 12 — garnituri de etanșare; 13 — camera de recoltare; 14 — piesă sabot cu filtru la sită.

pient 1 (fig. 175) cu robinete cu ac la ambele capete, aparatul de recoltat fiind introdus într-o manta dublă cilindrică, între ai cărei pereți poate circula apă încălzită la temperatura de fund.

După umplerea întregii instalații (cu excepția aparatului de luat probe) cu apă (fig. 175) și după evacuarea completă a aerului, se încăl-

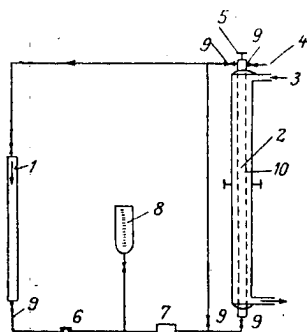


Fig. 175. Schema instalației de transvazare a probei din aparatul de extracție în recipientul de înmagazinare: 1 — recipient de înmagazinare; 2 — aparat de luat probe; 3 — circuit de încălzire cu apă cu temperatură constantă; 4 — manometru; 5 — fus pentru deschiderea supapelor aparatului de extras probe; 6 — fereastră de control; 7 — pompă de presiune mare (5 — 700 at); 8 — biuretă de alimentare cu apă; 9 — robinete cu ac; 10 — manta încălzitoare basculantă.

zește aparatul de luat probe la o temperatură egală cu temperatura de fund și se agită aparatul de luat probe prin oscilarea mantalei 10, pînă cînd, la stabilirea echilibrului, manometrul 4, cuplat prin deschiderea sertarelor din aparatul de luat probe cu ajutorul fusului 5, indică stabilizarea presiunii. Dacă presiunea astfel atinsă este egală cu cea măsurată la fund la adîncimea de recoltare, se obține certitudinea conservării probei.

În cazul cînd presiunea indicată este mai mică, se poate trage concluzia că aparatul nu s-a închis etanș, că închiderea aparatului nu s-a făcut la adîncimea la care s-a măsurat presiunea de fund, ci mai sus, sau că există aer sau scăpări în porțiunea de instalație cuplată cu aparatul de luat probe.

După verificare, se închid robinetele instalației care fac legătura între aparatul de luat probe și ea, se face presiune în instalație în aval de pompa 7, pînă la presiunea din aparatul de luat probe, aspirînd excesul de apă necesar comprimării și deformării elastice a aparatului, din biureta 8. Apoi se procedează la transvazare prin deschiderea robinetelor circuitului de transvazare; sfîrșitul operației se verifică cu ajutorul ferestrei de control 6.

2) Aparatură pentru cercetarea probelor și metodică cercetării. Aparatură și metode de determinare a punctului critic (P_c și T_c). Se folosesc, în acest scop, metode statice și metode dinamice. Prin metodele statice se studiază proba în repaus, într-un

recipient cu perete transparent, menținîndu-se temperatura și presiunea în gama în care urmează să se determine punctul critic. Identificarea acestei situații se poate face teoretic prin studiul oricărei proprietăți fizice a fazei lichide și a fazei gazoase (v. IV A.c.2); se studiază, de preferință, numai acea proprietate care prezintă deosebiri cît mai importante între cele două faze și este mai ușor de măsurat.

Una dintre cele mai mari dificultăți la determinarea punctelor critice ale amestecurilor cu greutate medie moleculară mare o constituie instabilitatea chimică a unora dintre componenți în gama de temperaturi cercetate. Pentru evitarea acestei dificultăți, s-a recurs la metodele dinamice, în care amestecul în curgere cu viteză suficient de mare este expus temperaturilor înalte respective numai un timp insuficient descompunerii efective.

Metodele statice se folosesc, de obicei, pentru identificarea atingerii stării critice, de fenomenul de dispariție a meniscului de separație a fazei lichide de cea gazoasă datorită: anulării tensiunii superficiale, egalizării indicilor de refracția luminii ai celor două faze și egalizării greutăților lor specifice. La metodele dinamice, fenomenul nu mai este vizibil și în acest caz se folosesc alte fenomene caracteristice: formarea unei ceațe și colorația caracteristică. Formarea ceaței caracteristice are loc în cursul scăderii lente a presiunii, amestecul curgînd la temperatura constantă cercetată, în momentul atingerii condițiilor critice. Deși nu este strict caracteristică stării critice, în aceste condiții, ceața are elemente cu densități foarte apropiate ceea ce îi conferă o stabilitate caracteristică. Variația culorii este însă și mai caracteristică: în cursul detentei (în domeniul de comportare normală), culoarea amestecurilor naturale de hidrocarburi la presiuni și la temperaturi apropiate de cea critică trece de la brun (lichid) la cenușiu-gălbui (gaz). Experimental s-a constatat că în imediata apropiere a punctului critic, practic, pentru toate amestecurile naturale de hidrocarburi există un domeniu restrîns de P și de T în care sistemul capătă o colorație roșcată cu totul caracteristică. La amestecurile cu componenți foarte diferiți, identificarea prin ceață nu este suficient de precisă. Prin metoda colorației caracteristice, intervalul de incertitudine este redus la $\sim 0,5^\circ\text{C}$ pentru amestecuri mai omogene din punctul de vedere al greutății moleculare, la $\sim 4^\circ\text{C}$, pentru cele mai eterogene.

La determinarea punctului critic se poate comite eroarea de a interpreta greșit fenomenele (mai ales, prin metoda formării ceații) și de a confunda punctul critic cu punctul de temperatură maximă sau de presiune maximă a sistemului bifazic (v. A.c.3). Analiza reprezentării grafice a rezultatelor obținute permite, în general, o identificare rapidă a confuziei. Dacă punctul de presiune maximă

(cricondenbar) este situat, în general, aproape de punctul critic (la o diferență de presiune de mai puțin decât o atmosferă), punctul de temperatură maximă (cricondentermul) poate fi situat departe de punctul critic (până la 25°C și 15 at).

Metoda statică, mai puțin precisă decât cea dinamică din cauzele menționate (la amestecurile cu T_c mare), este folosită, în general, numai în cazul determinării simultane, cu aceeași aparatură, și a altor proprietăți fizice (în special a raportului cantitativ procentual dintre faze, (v. fig. 18 și 20).

Aparatul cel mai cunoscut este cel reprezentat în fig. 176, compus dintr-o celulă cu

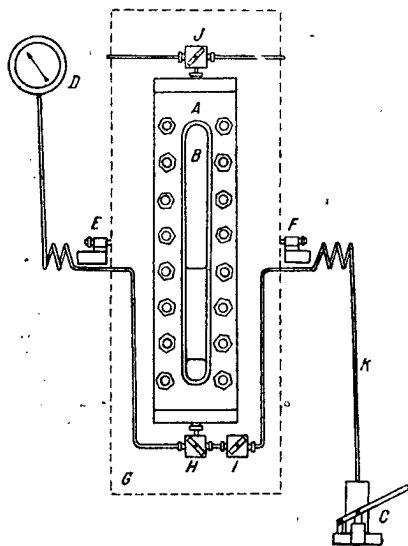


Fig. 176. Schema celulei și a instalației de determinare a punctului critic și studiul comportării de fază a sistemelor de hidrocarburi în apropierea punctului critic: A—celula; B—sticlă de nivel; C—pompă de mină cu Hg; D—manometru calibrat; E—F—axă de oscilație; G—baie de aer; H—robinet cu ac; I—robinet cu ac; J—robinet cu ac; K—țevă de încălzire.

sticle de nivel, al cărei conținut se poate observa prin transparență. Raportul dintre volumele fazelor prezente se determină prin lectura mirei adiacente ferestrei, ale cărei indicații se corelează cu ajutorul unei curbe de etalonare experimentală, prin umplere cu mercur. Pentru atingerea echilibrului de faze, este necesară o agitare care se realizează prin bascularea aparatului în jurul axei E—F, legăturile la manometrul calibrat D și la pompa de mină C fiind asigurate prin țeava de cupru K flexibilă și răsucită în spirală, pentru sporirea flexibilității.

După încălzirea celulei cu probă (după eliminarea aerului cu Hg), după încălzirea ei în baia de aer G, la temperatura de cercetare, și după ridicarea presiunii la o valoare supe-

rioară celei de cercetare, se procedează la agitare. La condițiile critice, diferența de densitate, practic nulă, dintre faze ar fi insuficientă pentru agitare, astfel încât aceasta este asigurată de excedentul de Hg din celulă.

Prin scăderea în trepte a presiunii, urmată de agitare pentru atingerea echilibrului, se

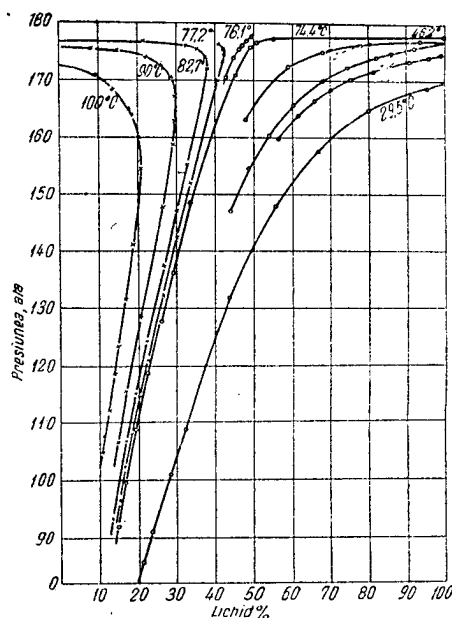


Fig. 177. Diagrama de studiu cu ajutorul aparatului reprezentat în fig. 176. Curbele de comportare izotermă ale unui sistem de gaze-gazolină; la temperatura 100°C; 90°C, 82,7°C, 77,2°C, 76,1°C, 74,4°C, 62,2°C, 48,3°C, 38,8°C și 29,4°C.

ridică diagrama ca aceea din fig. 177, prin reportarea, la fiecare temperatură de studiu, a procentajului de faze lichide prezente la fiecare presiune.

Rezultatul determinărilor se reprezintă, de obicei, și sub forma unei diagrame ca aceea din fig. 178.

Printr-o completare a operațiilor cu măsurarea exactă a cantităților de material supus probei, aparatul servește la un studiu aproape complet al comportării de fază.

Aparatul Fokeev, care are o construcție foarte simplificată și dimensiuni foarte mici, permite determinarea mai precisă a punctului critic și a viscozității fazelor prezente în condițiile de P și de T examinate. Acest aparat este un condensator tubular, a cărui capacitate poate fi determinată prin introducerea lui într-un circuit oscilant, a cărui frecvență este măsurată prin comparație (metoda heterodiniei, măsurându-se de obicei diferența de frecvență). El poate fi alcătuit fie ca în fig. 179, pentru măsurători mai exacte însă numai în domeniul de P, T monofazic, fie ca în fig. 180,

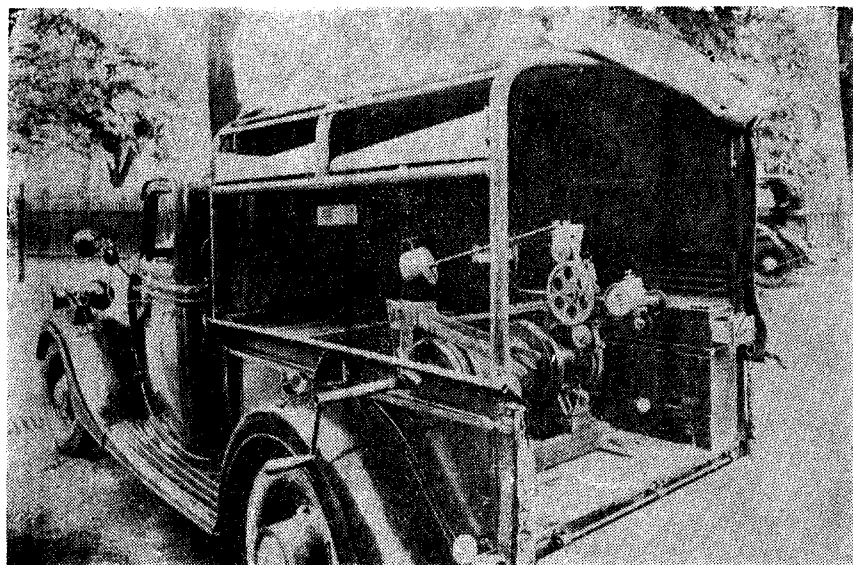


Fig. 177 a. Instalație pentru introducerea aparatului de recoltat probe de fund.

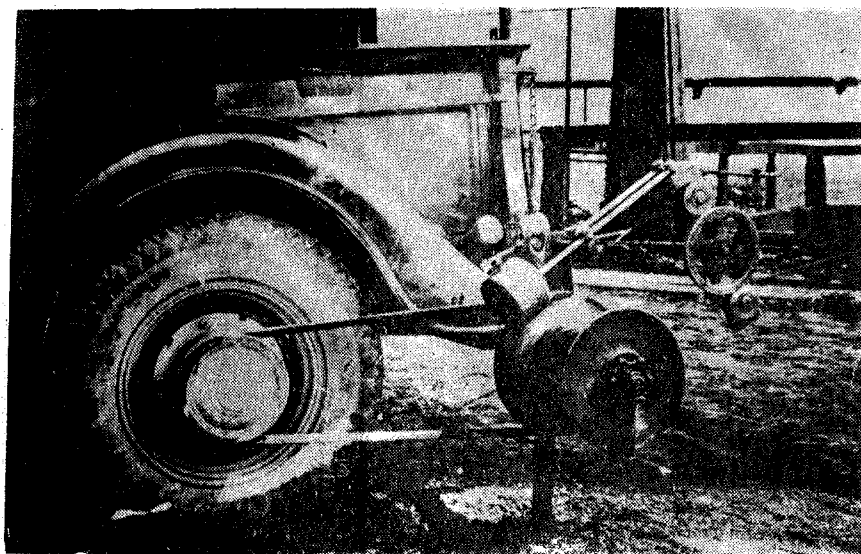


Fig. 177 b. Acționarea instalației de la butucul roții.

numai pe o porțiune a celulei pentru agitare și pentru ca prin basculare să se poată determina permitivitatea fiecăreia dintre faze.

Prin studiul variației izoterme a permeabilității dielectrice (permitivității) celor două

cularea prin serpentine încălzite în băile de plumb topit 8--11, amestecul este trecut prin celula de observație, prin robinetul de control 12 și este colectat, prin 13, în recipientul 14. Temperatura este măsurată cu două termocu-

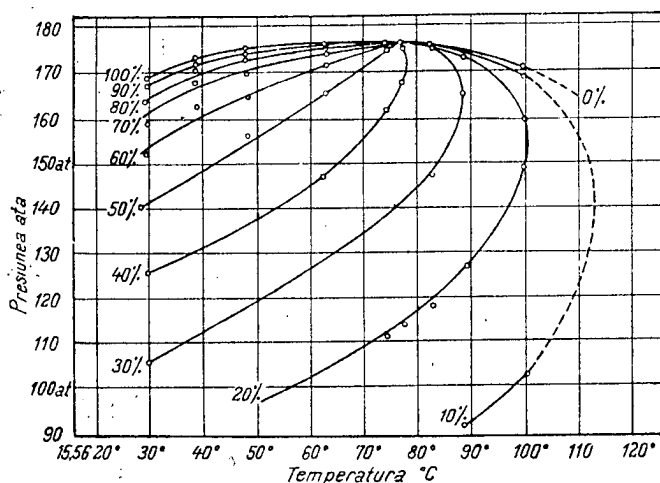


Fig. 178. Diagrama compoziției de fază în coordonatele (P, T), a sistemului studiat și reprezentat în fig. 177.

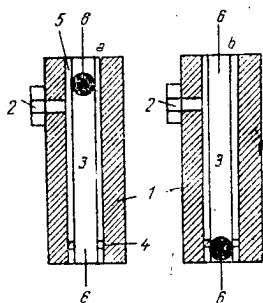


Fig. 179. Schema unui permitivmetru-condensator cu lichid Fokeev pentru studiul permitivității și al viscozității fazelor unice:
a și b — pozițiile limită la măsurarea viscozității;
1 — celula metalică-armătura exterioară a condensatorului; 2 — racord de încărcare și de măsurare a presiunii; 3 — tub-armătură interioară a condensatorului; 4 — inel izolant; 5 — bilă căzătoare; 6 — contacte metalice la capetele de cursă ale bilei.

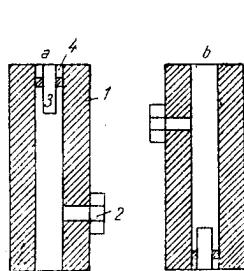


Fig. 180. Schema unui permitivmetru-condensator cu lichid Fokeev folosit pentru studiul comportării de fază — determinarea punctului critic:
1 — celula metalică, armătura exterioară a condensatorului; 2 — racord de încărcare și de măsurare a presiunii; 3 — tub-armătură interioară a condensatorului; 4 — inel izolant.

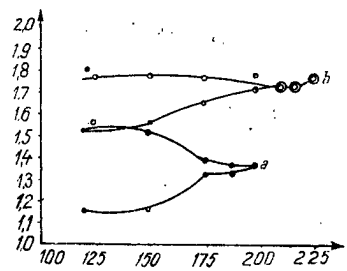


Fig. 181. Determinarea punctului critic cu ajutorul condensatorului permitivmetru Fokeev:

a — comportarea sistemului la variația izotermă a presiunii, la temperatura critică; ramura inferioară — permitivitatea fazei gazoase; ramura superioară — permitivitatea fazei lichide a sistemului metan + n-pentan (compoziție particulară); b — comportarea sistemului la variația izotermică a presiunii, la temperatura critică, a unui sistem pentan + gaze naturale de sondă, porțiunea comună a celor două ramuri corespunde fazei fluide supercritice convențional numită «gazoasă».

faze, în funcție de presiune și prin detectarea condițiilor de coincidență se determină punctul critic (v. fig. 181).

Metoda dinamică folosește o celulă de cuarț de fuziune, cu un canal cu diametrul interior de ~ 5 mm, în care este trecut amestecul de studiat. Acesta este deplasat din cilindrii de alimentare 4 și 5 (v. fig. 182) de azotul sub presiune din butelia 1. După cir-

pluri, fier-constantan ale căror suduri sunt situate în punctul de intrare, respectiv de ieșire a amestecului din celula de cuarț (nu sunt reprezentate în fig. 183). Din cauza pierderilor, temperaturile indicate diferă cu 3—5°C. Punctul de observație fiind în regiunea centrală a tubului de cuarț și considerând că pierderile sunt localizate, în special, la capetele metalice, media celor două citiri se ia drept

temperatură a probei. Pentru presiune se folosește un manometru calibrat și civizat la 0,5 at, între 0 și 70 ata (pentru amestecurile deosebit de eterogene, este necesar un manometru sau scara mai largă: 0–200 ata).

~0,05–0,10 s în celula de cuarț; ~0,07–0,11 s. în racordurile celulei, lângă termocupluri.

Pentru a obține rezultate acceptabile, este necesară citirea simultană a temperaturilor la cele două termocupluri și a presiunii la mano-

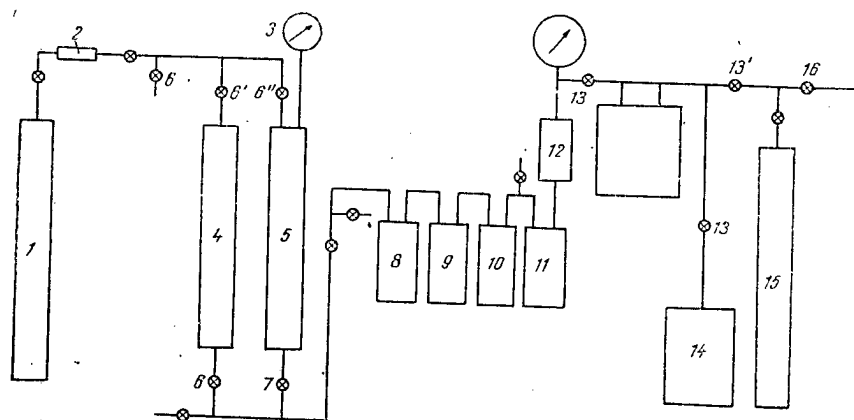


Fig. 182. Schema instalației pentru determinarea prin metoda dinamică a punctului critic: 1—butelia cu azot comprimat; 2—reductor de presiune; 3—manometru de control; 4,5—cilindru de alimentare cu amestecul de analizat; 6,6',7—robinete de control al presiunii și de manevră a cilindrilor de alimentare; 6 la 11—băi de încălzire cu plumb topit; 12—celula de observație; 13, 13'—robinete de control al debitului; 14—recipient de colectare; 15—butelie cu azot comprimat la joasă presiune, pentru curățire; 16—legătură de aer comprimat pentru curățirea prin ardere a eventualului cocs de cracare.

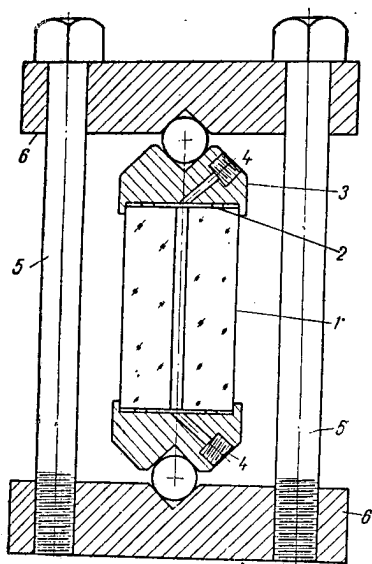


Fig. 183. Celula de cuarț pentru observație: 1—tub de cuarț; 2—garnitură de Cu + asbest; 3—piese terminale de invar; 4—locașuri de termocupluri și racordurile tuburilor de curgere; 5—bolșuri de oțel; 6—plăci de strângere cu articulații cu bilă.

Duratele de încălzire, respectiv, trecere, sînt: 2–3 s, în preîncălzitoare; mai puțin decît 0,3–0,5 s. în ultimul încălzitor capilar;

metre. Operația are loc prin realizarea unui curent lichid la o temperatură apropiată de cea critică, prin scăderea presiunii (comportare normală), urmată la nevoie de creșterea ei (comportare retrogradă) observîndu-se vaporizarea. Prin schimbarea temperaturii, se realizează ceața și colorația caracteristică, determinîndu-se intervalul de presiune și de temperatură în care este cuprins punctul critic.

Aparate pentru determinarea numai a relației (P, v, T) sau (și) a coeficienților de variație ai volumului, prin trecerea de la condițiile de zăcămint la cele de suprafață:

— Aparatura de tipul B.M. cuprinde: recipiente de înmagazinare, pompă de mină cu Hg, cadru-bască pentru transvazare (fig. 174–10), aparat pentru eliberarea «diferențială», aparat pentru eliberarea «de contact», «picnometru» (recipient etalonat sub presiune), aparat pentru relația (P, v, T).

— Aparatul pentru eliberarea diferențială (v. fig. 184) cuprinde o celulă tubulară B, care comunică cu o sticlă de nivel A, tubulară de legătură (fig. 184) și manometrele 5 și 6. Capacitatea ansamblului cuprins între robinetele 1 și 2 este etalonată la presiunea și la temperatura de lucru (se dispune de curbe pentru diferite condiții, ridicate în prealabil), prin umplerea cu mercur, ținîndu-se seama de capacitatea tubului de legătură cu manometrele și de creșterea de volum a tuburilor elastice ale acestora, la creșterea presiunii. În aceleași

condiții este etalonat și volumul cuprins între robinetul 2 și diferitele planuri orizontale de cota înregistrată pe scara sticlei de nivel A. Ansamblul este cufundat într-o baie de apă încălzită electric la temperatura de 30–90°C,

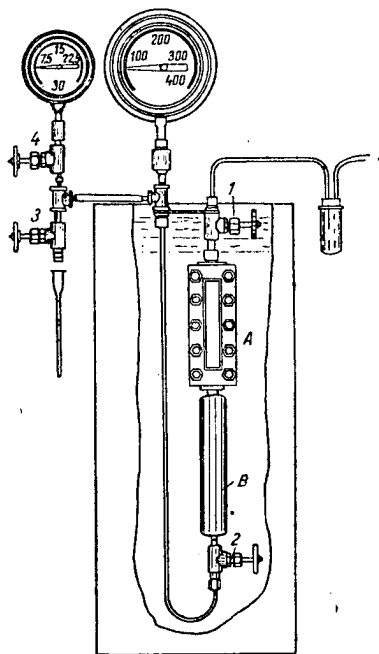


Fig. 184. Aparat B.M. pentru studiul eliberării diferențiale a gazelor din țiței: A — sticlă de nivel dublă; B — recipient metalic; 1 — robinet cu ac pentru evacuarea gazelor eliberate; 2 — robinet cu ac pentru evacuarea Hg; 3 — robinet cu ac pentru evacuarea Hg; 4 — robinet cu ac pentru legătura cu manometrul de joasă presiune; m — manometrul de joasă presiune 0–30 kg/cm²; M — manometrul de joasă presiune 0–400 kg/cm².

respectiv de ulei la temperaturi mai mari, dotată cu dispozitiv de reglare automată a temperaturii.

Pentru umplerea aparatului cu probă, se realizează în spațiul A–B, umplut cu Hg, o presiune mai mare cu circa 20 at decât aceea din recipientul de înmagazinare, presiune care la rîndul ei este mai mare decât valoarea probabilă a presiunii de început de eliberare a gazelor din soluție.

Prin deplasarea cu Hg sub presiune din recipientul de înmagazinare în A–B, spațiul de lucru al acestui aparat este umplut cu materialul de cercetat pînă aproape de reperul inferior al indicatorului de nivel, evacuîndu-se din mercurul din aparat, treptat, cantități suficiente de mici pentru ca presiunea din el să nu scadă sub valoarea propusă, pentru a asigura menținerea în soluție a gazelor. După umplere, vasul A–B este introdus în baie, este încălzit pînă la temperatura de strat iar presiunea sporită prin dilatația termică se

reglează prin evacuarea de Hg. După stabilirea presiunii și a temperaturii, se începe determinarea propriu zisă, care constă în eliminarea prin 2 și 3, de porțiuni mici (de exemplu 0,5 cm³) de Hg, colectate și măsurate într-o biuretă, ceea ce permite deducerea sporului de volum al amestecului de hidrocarburi rămas în aparat și cauzează scăderi de presiune care se observă și se notează. După fiecare eliminare, înainte de citire, se agită vasul A–B prin basculare repetată.

La atingerea presiunii de saturatie, din cauza eliberării gazelor, se observă o scădere mult mai redusă a presiunii, pentru o aceeași cantitate de Hg eliminată.

Prin raportul dintre volumul ocupat de lichid în condițiile inițiale (de strat) și în acelea de la începutul eliberării, se determină coeficientul de variație al volumului probei în domeniul monofazic. După atingerea acestei presiuni, se mai evacuează din A–B o cantitate de Hg suficientă pentru a permite apariția în sticla de nivel a meniscului gaz-lichid. După aceea, se scade treptat presiunea, evacuînd din gazele eliberate cu ajutorul robinetului 1. La fiecare evacuare, meniscul gaze-lichid scade puțin; după agitare suficientă pentru a atinge echilibrul de temperatură și stabilizarea presiunii, se citește: volumul ocupat de lichid între meniscul gaz-lichid și meniscul lichid Hg, presiunea de echilibru și volumul de gaz evacuat și colectat la presiunea atmosferică într-o biuretă (ne reprezentată în fig. 184). La calculul volumului de gaz eliberat și colectat se ține seama și de micul volum de gaze rămase în aparat pentru vizibilitatea meniscului.

La fiecare evacuare treptată, durata de agitare necesară sporește (la circa 30–60 minute pentru presiuni de 30–40 at). După atingerea presiunii atmosferice și după răcire, se evacuează din aparat ultima fracțiune de gaze.

Pe baza măsurătorilor efectuate se obține: 1) volumul fazei lichide la diferite presiuni (prin comparație cu acela al țițeiului final «stabilizat» sau «mort»); 2) coeficientul de variație a volumului, exprimat fie prin diferență (coeficient de contracție) (fig. 185) fie prin raport (coeficient de volum²); 3) volumul atmosferic al gazelor ieșite din soluție (rația de gaze eliberate); volumul în aceleași condiții standard al gazelor rămase în soluție (rația de soluție), prin diferența dintre rația de gaze eliberate și rația inițială de soluție la presiunea de strat; și 4) volumul specific al fazei lichide, ținînd seama de greutatea țițeiului «mort» recoltat și de greutatea gazelor eliberate din soluție.

Rezultatele determinărilor se reprezintă ca în fig. 185.

Cantitatea de gaze astfel eliberată între presiunea inițială și presiunea variabilă rămasă în aparat este mai mică decât în cazul eliberării «de contact», la care gazele ieșite din soluție

²) Denumit uneori «factorul micșorării de volum».

rămân neevacuate, în contact cu faza lichidă, pînă la sfîrșitul detentei.

— Aparatul pentru eliberarea « de contact » se compune din aceleași părți (v. fig. 186). Pentru cunoașterea exactă a încărcăturii lui, proba este introdusă prin deplasare cu mercur

ocupate de gazul eliberat (citit direct) și de mercurul rămas în aparat (prin diferența dintre Hg încărcat și cel eliminat). Mărimile determinate final sînt aceleași ca în cazul eliberării diferențiale; numai valorile lor sînt întrucîtva diferite; cantitatea de gaze eliberate mai mare, variația volumului țigieiului mai mare, densitatea țigieiului rezidual mai mare. În cazul exploatarea curente a sondelor din zăcămintul respectiv cu separarea

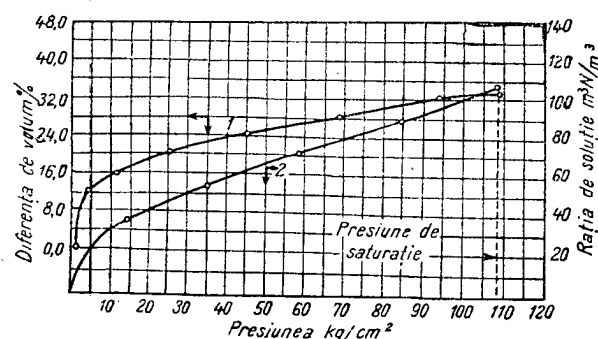


Fig. 185. Reprezentarea rezultatelor studiului eliberării diferențiale: 1 — curba diferenței de volum a fazei lichide între condițiile de analiză și cele atmosferice; 2 — curba cantității de gaze rămase în soluție în funcție de presiune.

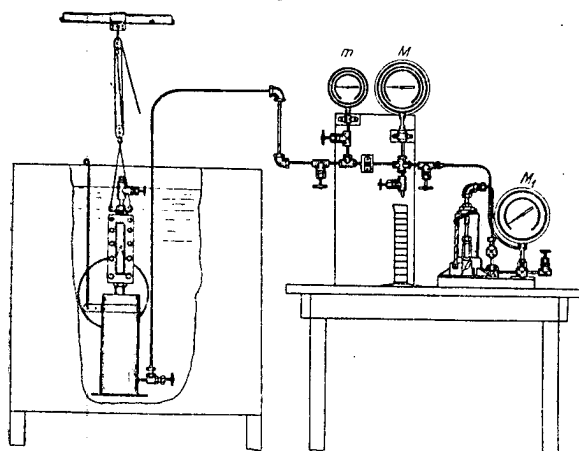


Fig. 186. Aparat și instalație pentru studiul eliberării « de contact »: A — recipient de probă; m și H — manometrele de măsurare; p — pompa de mină cu Hg; M₁ — manometru de control.

din « picnometrul » B (v. fig. 187), în care materialul de probă este măsurat între robinetele 2 și 3, după stabilirea în el a aceleiași presiuni și a aceleiași temperaturi ca în aparat. Vasul C servește la captarea excesului de material de probă încărcat în B la rece și eliminat din B la cald, pentru reglarea presiunii.

Operația decurge în mod analog, presiunea este scăzută prin eliminarea de Hg, iar volumul ocupat de gaze este citit la sticla de nivel. Volumul ocupat de lichid este determinat indirect (deoarece ne mai eliminând gazele din aparat, nivelul țigiei-Hg scade sub fereastră), prin diferența dintre volumul total al aparatului (cunoscut prin calibrare) și volumele

gazelor de țigiei la înaltă presiune, operația de măsurare se efectuează în mod corespunzător: I) de la presiunea de zăcămint la aceea de separator, în condiții « de contact » și după eliminarea gazelor astfel separate; II) mai departe pînă la presiunea atmosferică, în același mod.

Modificarea produsă curbelor rezultate este reprezentată în fig. 188.

— Aparatul pentru determinarea relației (P, v, T) este asemănător aceluia « de contact », cu deosebirea că îi lipsește celula cu sticla de nivel. Aparatul este încărcat cu circa 2 000 cm³ probă, cu ajutorul picnometrului (circa 100 cm³). El este descărcat progresiv prin

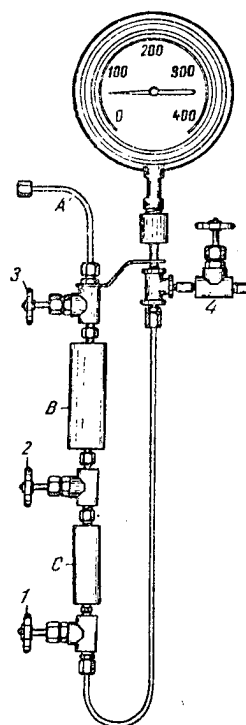


Fig. 187. Picnometru: A — racord; B — recipient tarat între 2 și 3; C — recipient de descărcare după încălzire; 1 și 4 — robinete de încărcare; 2 și 3 — robinete de măsurare.

evacuarea treptată de Hg, iar volumul global al amestecului este dedus din suma dintre volumul inițial al amestecului și volumul mercurului evacuat, ținându-se seamă de variația volumului mercurului și a aparatului (v. fig. 189).

Rezultatele măsurătorilor sînt exprimate sub forma: $v = f(P_i)_{T_z}$, unde T_z este temperatura de zăcămint, și sub forma $v = f(P_i)_{T_s}$,

unde T_s este temperatura la extremitatea superioară a țevelor de extracție. Prin aplicarea legii la curgerea țițeiului în țevile de extracție în condițiile «de contact», se construiește curba $v = f(P_i T_i)$, unde $T_i = \varphi(P_i)$. Relația este determinată prin măsurarea presiunii și a temperaturii de-a lungul țevelor de extracție. Din cauza dificultății repetării experiențelor la diferite temperaturi, acestea se efectuează numai la cele extreme T_s și T_z , și se deduc prin interpolare cele intermediare. Fig. 190 reprezintă curbele ridicate și curba ipotetică a variației volumului cu presiunea în condițiile din gaura de sondă, iar fig. 191, construcția acestei curbe.

Curba 3 din diagramele reprezentate în fig. 190 și 191 permite și determinarea cantității de energie de expansiune potențial disponibilă în amestecul gaze + lichid, între două limite oarecare de presiune și de temperatură, prin integrarea grafică a curbei

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV.$$

Determinarea greutateii specifice a amestecului se efectuează sub forma $\gamma = \frac{1}{v}$,

unde $v = \frac{V}{G}$, V fiind volumul ocupat de G kg amestec încărcat în aparat, iar G este determinat fie cu ajutorul picnometruului (mai puțin exact, din cauza greutății mari a acestuia în comparație cu a probei), fie prin măsurarea volumelor finale de gaz și de lichid și prin multiplicarea lor cu greutateile specifice respective, în condițiile atmosferice.

Aparatura de tipul EL cuprinde o pompă-presă, o bombă de (P, v, T) și aparatul de luat probe, cum și aparatură curentă de laborator: biuretă (v. fig. 197), tubulură de racord, regulator de presiune și contor volumetric. Aparatură,

care este relativ ușor de transportat, este concepută pentru determinarea presiunii de saturație, a caracteristicii de eliberare prin contact și diferențială și a relației (P, v, T) .

— Pompa-presă de mercur este piesa caracteristică a instalației prin faptul că este în același timp și un aparat de măsură a volumului de mercur injectat, la presiunea de lucru și cu o exactitate remarcabilă. Ea este compusă (v. fig. 192) dintr-un piston 7, care este introdus

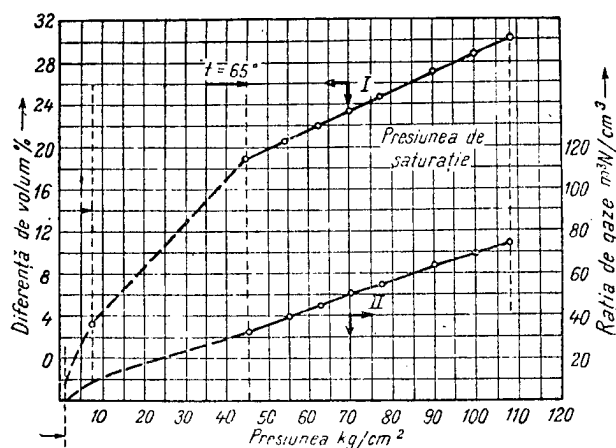


Fig. 188. Curbele de eliberare de contact în cazul existenței unei trepte de separație a gazelor de țiței la medie sau la înaltă presiune: I — curba diferenței de volum a fazei lichide; II — curba răției de soluție. Presiunea de strat — 108 kg/cm²; Presiunea de separație la înaltă presiune — 45 kg/cm²; Presiunea de separație la joasă presiune — 5 kg/cm².

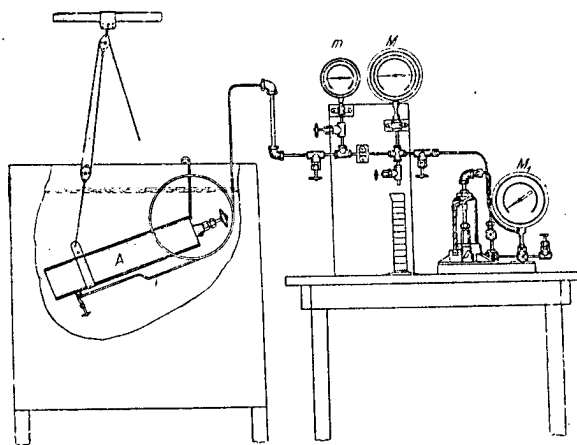


Fig. 189. Aparatul și instalația B.M. pentru studiul relației (P, v, T) .

în cilindrul 6 de șurubul 9, împins axial de mutelca 10, acționată de roata de mină 15 și sprijinită prin rulmenții axiali 12 de cadrul 11. Ea este în legătură cu manometrul 3, cu pilnia de umplere cu Hg, 2 și cu conducta 1 pentru legătura cu bomba, respectiv cu

aparatur de luat probe. Volumul maxim de Hg deplasat la o cursă este de 100 cm³ (circa 1 cm³ la o rotație) și poate fi măsurat cu o eroare mai mică decât 0,01 cm³ cu ajutorul numărătorului de rotații 14. În cazul lucrărilor

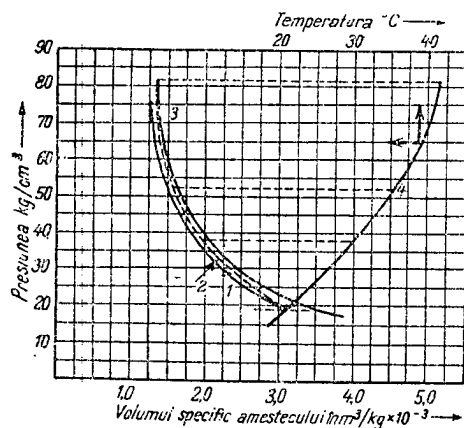


Fig. 190. Curbele de variație a volumului specific al amestecului de gaze-țifei între condițiile de fund și cele de suprafață. Punctat: la temperatura efectivă (variabilă între 41,8 și 21°C).

de amănunt, precizia poate fi dusă mai departe, dar devine necesară introducerea corecției de dilatare termică a volumului de mercur trecut din presă (temperatura camerei) în aparatul de cercetare (temperatura de strat).

Corecția se face conform relației:

$$V_t = V_0 (1 + 0,181812 \cdot 10^{-3} t + 7,8 \cdot 10^{-9} t^2) \quad (184)$$

în care:

V_t este volumul Hg la temperatura $t^\circ\text{C}$;

V_0 — volumul Hg la temperatura 0°C .

Pentru verificarea prin comparație cu volumul eliminat din aparate, la presiunea atmosferică, se folosește coeficientul β de compresibilitate al Hg, determinat prin relația

$$\beta = \frac{1}{V} \cdot \frac{\partial V}{\partial P} = (3,74 + 8,10^{-3} t) \cdot 10^{-6}, \quad (185)$$

în cm²/kg.

— Aparatur de luat probe de fund, care constituie o parte integrantă a instalației de cercetare, este relativ necorespunzător din cauza dispozitivului de deschidere (umplerea se face pe la o singură extremitate). El este construit în două variante: una cu deschidere prin topirea în 10–12 minute a diafragmei de staniu 4 (fig. 193), și alta prin perforarea unei diafragme subțiri de oțel 6 (fig. 195) cu ajutorul acului 5 fixat la ventilul 4 al supapei acționată la momentul dorit prin ridicări și prin coborâri frecvente ale aparatului. Dacă

țifeiul din sondă nu este prea viscos, se realizează o oscilație în rezonanță a piesei 2 care, la elongația maximă, lovește tija supapei 3 și acul 5 și străpunge diafragma 6.

Afară de dezavantajul că nu respectă starea monofazică din cauza depresiunii brusce și a pierderii de presiune în orificiul diafragmei, aparatul trebuie introdus în sondă cât mai complet evacuat de aer în prealabil, iar aerul rămas neevacuat alterează rezultatele probei.

Dată fiind imperfecția acestor aparate, se poate folosi în același scop aparatul reprezentat în fig. 171–173, acționarea pentru descăr-

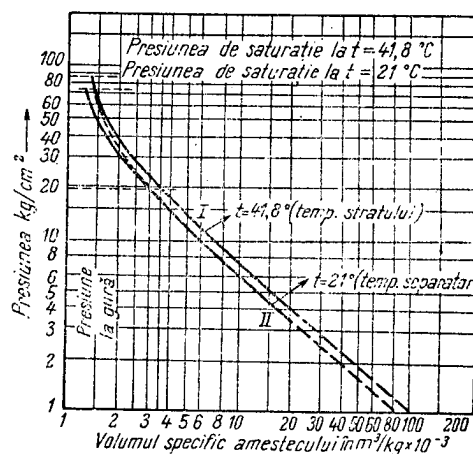


Fig. 191. Construcția curbei de variație efectivă a volumului specific al amestecului de gaze-țifei, între condițiile de fund și cele de suprafață:

1 — curba corespunzătoare temperaturii T_0 ; 2 — curba corespunzătoare temperaturii reale; 3 — curba corespunzătoare temperaturii T_s ; 4 — curba repartiției temperaturii, în funcție de presiunea obținută prin eliminarea parametrului comun, adică H din $T_i = f(H)$ și $P_i = f(H)$.

care făcându-se identic prin împingerea cu același fus 4 din fig. 195 a supapei 2 din fig. 170 în locul supapei 3 (fig. 193) sau 4 (fig. 195) cu luarea măsurilor de precauție corespunzătoare pentru a se împiedica pierderii din supapa 3 (fig. 193).

— Bomba de P , v , T este un recipient de oțel 1, basculant, dotat cu două robinete cu ac 2 și 3 (fig. 198) la cele două extremități și cu pîrghia de basculare 4.

Volumul bombei este calibrat prin umplere cu Hg, atât la presiunea atmosferică (prin evacuare și prin cîntărire urmată de corecțiile de temperatură prin dilatarea Hg și a bombei și de comprimarea elastică a Hg, respectiv deformarea elastică a bombei), cât și la presiunea și la temperatura de lucru, cu ajutorul pompei prese. Etalonarea principală este considerată cea sub presiune și este completată prin etalonarea la diferite presiuni inferioare (intermediare între cea maximă și cea atmosferică),

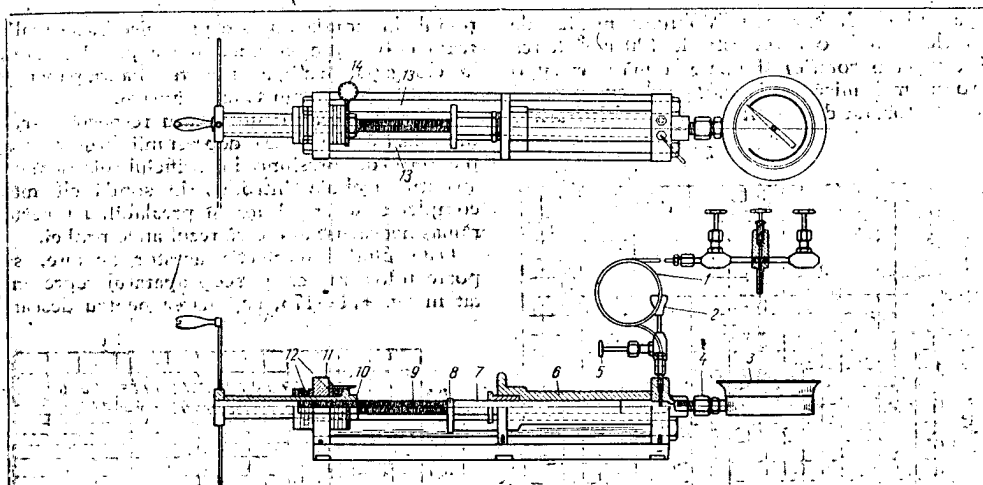


Fig. 192. Pompa-presă pentru injectarea și pentru măsurarea cantității de Hg injectat:
 1 — racord de alimentare a aparatelor deservite de pompă; 2 — pilnie de alimentare cu mercur a pompei; 3 — manometru de precizie; 4 — racordul manometrului; 5 — robinet de umplere pentru 2; 6 — cilindru pompei; 7 — pistonul pompei; 8 — glisieră de ghidaj; 9 — șurub; 10 — mutelă de acționare a pistonului; 11 — cadrul pompei; 12 — rulmenți axiali; 13 — tiranți; 14 — numărător de rotații.

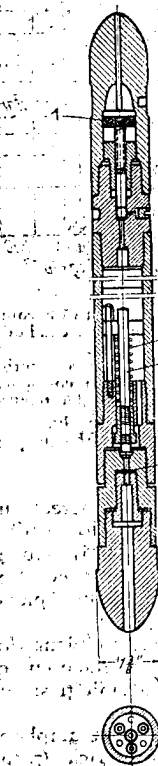


Fig. 193. Aparat E.L. pentru recoltarea de probe de fund de tipul cu diafragma fuzibilă:
 1 — robinet cu aer; 2 — resortul supapei; 3 — ventilul supapei; 4 — diafragma de Sn; 5 — sabot.

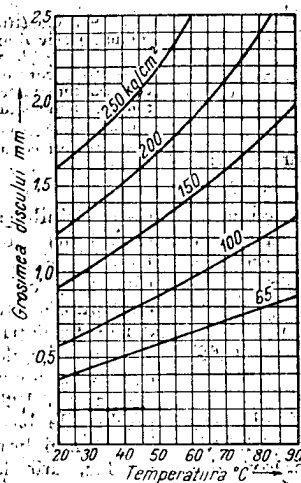


Fig. 194. Diagramă de determinare a grosimii diafragmei de Sn, în funcție de temperatură și de presiunea de deschidere.

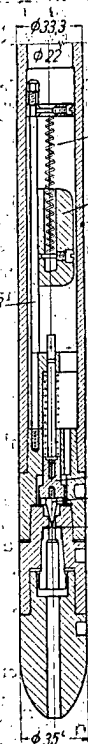


Fig. 195. Aparat E.L. pentru recoltarea de probe de fund de tipul cu diafragma metalică perforată:
 1 — resort de suspenzie pentru 2; 2 — piesă; 3 — tijă de ghidaj; 4 — ventilul supapei; 5 — acul perforator; 6 — diafragma de oțel; 7 — sabot.

prin colectarea Hg eliminat în trepte, prin corectarea volumului lui pentru diferența de condiții (P, T) dintre atmosferă și bombă *), în funcție de presiunea rămasă în bombă după fiecare descărcare parțială.

Determinarea presiunii de început de eliberare a gazelor din soluție se efectuează cu aceeași aparatură, la creșterea presiunii. Din cauza modului de lucru al aparatului de recoltare (umplerea pe la o singură extremitate) și din cauza prezenței resortului puternic al supapei, proba este

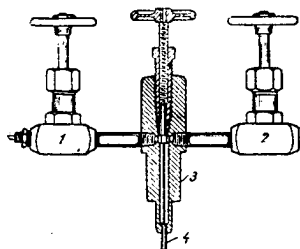


Fig. 196. Dispozitiv de racord și de deschidere sub presiune a aparatului de recoltat probe reprezentat în fig. 189 și 191 (echivalent dispozitivului 5 din fig. 171): 1 și 2 — robinete de legătură la presă, la manometre sau la recipient; 3 — cap pentru racordarea la aparatul de luat probe de fund; 4 — ac de deschidere a supapei din aparatul de luat probe de fund.

captată la o presiune inferioară aceleia din sondă și, deci, se află practic totdeauna sub forma a două faze. Pentru a obține o extragere de probă în egale proporții din cele două faze, este necesară aducerea la starea monofazică prin comprimare. Această operație este folosită și pentru determinarea presiunii de saturație (trebuie observat că aceasta nu remediază defectele inerente ale aparatelor care recoltează proba printr-o singură deschidere). Se cuplează la presă și aparatul de recoltare, dispozitivul reprezentat în fig. 196, se face vid în acesta și apoi se umple cu Hg. Se comprimă Hg prin injectare treptată cu ajutorul presei, observându-se continuu manometrul acestuia, pînă cînd o bruscă scădere a presiunii indică deschiderea supapei aparatului de recoltare. Se continuă injectarea treptată și cu agitare după fiecare injectare, notîndu-se creșterea de presiune rezultată, în funcție de volumul injectat. Sfîrșitul intrării în soluție a gazelor este indicat de o creștere a raportului dintre creșterea presiunii și cantitatea de Hg injectat, la fiecare injectare. Pentru mărirea preciziei determinării, operația se repetă de cîteva ori, reprezentîndu-se rezultatele obținute atît la urcarea, cît și la coborîrea presiunii.

Determinarea rației de soluție și a coeficientului de

volum se face mai puțin exact cu această aparatură, între presiunea de saturație și aceea de separator, prin eliberare de contact, la temperatura camerei. În acest scop se folosesc: pompa-presă, aparatul de recoltat probe, dispozitivul de racord (fig. 196), biureta specială reprezentată în fig. 197, cum și manometrul, contorul și regulatorul reprezentate în fig. 197.

Biureta este folosită numai pentru determinarea volumului țigieiului în condițiile finale (presiunea finală se alege între 0,75—1,3 kg/cm², corespunzător separatorului de joasă presiune, respectiv 25—50 mm col. apă, corespunzător condițiilor de rezervor, astfel încît biureta trebuie să reziste în serviciu la o supra-presiune interioară de 1,3 at). Contorul de gaze este de tip volumetric, pentru debite mici, cu inerție redusă și, în cazul cînd este umplut cu apă, este corectat pentru saturația gazelor cu vapori de apă.

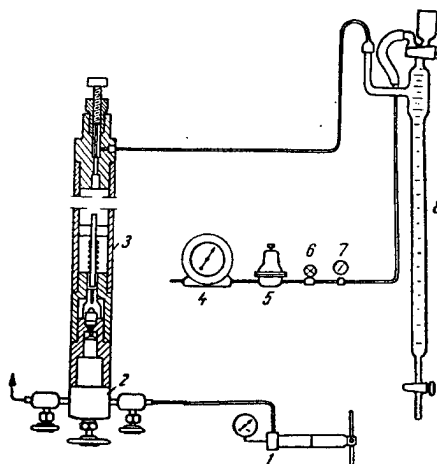


Fig. 197. Schema instalației pentru determinarea expeditivă și aproximativă a rației de soluție și a coeficientului de volum:

1 — pompă-presă; 2 — dispozitiv de racordare (fig. 192); 3 — aparat de recoltat probe (cf. fig. 189 și 191); 4 — contor volumetric; 5 — regulator de presiune; 6 — robinet pentru probe; 7 — manometru; 8 — biuretă de separație.

Din aparatul de recoltat probe, încărcat și adus prin injectorul de Hg la o presiune superioară cu circa 75 at presiunii de saturație spre exemplu, cca 400 at, se eliberează în biuretă (printr-o deschidere foarte redusă a robinetului) o cantitate de amestec suficientă pentru ca, după stabilizare, să ocupe în biuretă un volum de circa 50 cm³, care se notează. După ce se readuce în aparatul de recoltare presiunea la circa 400 at, se eliberează o nouă cantitate de amestec, determinîndu-se din nou volumul lichidului. Volumul gazului se determină mai exact prin însumarea în contor în cursul întregii eliminări. Operația este de obicei repetată complet în condițiile presiunilor

*) Sau, în caz de descărcare a bombe prin intermediul pompei-prese, prin citirea volumului eliminat, la numărătorul de rotații al acesteia.

finale de 1,2 respectiv 0,75 at, respectiv 25–50 mm col. apă.

Pentru determinarea rației de soluție, se divide indicația totală a contorului de gaze, corectată pentru saturație, pentru presiune și pentru temperatură, prin suma volumelor de țigăi mort recoltate în biuretă.

Pentru determinarea coeficientului de volum, se divide volumul mercurului injectat în cursul întregii operații prin volumul țigăiului mort rezultat. Dacă se determină și greutatea specifică a gazelor și a țigăiului mort, se obține, prin înmulțirea cu volumele respective, greutatea probei examinate, și prin divizarea prin volumul mercurului injectat, greutatea specifică a fazei lichide la presiunea de saturație.

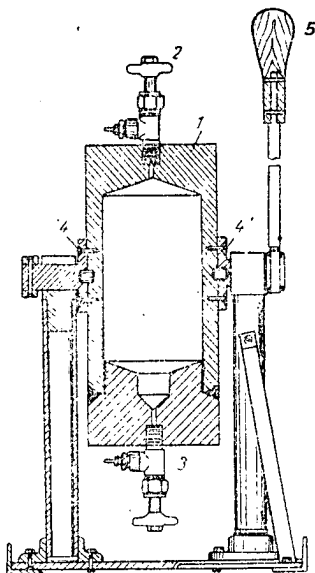


Fig. 198. Bomba pentru determinarea relației P, v, T : 1 — corpul bombe; 2 — robinetul superior; 3 — robinetul inferior; 4 și 4' — lagăre de basculare; 5 — pișghie de basculare.

Determinarea relației P, v, T se efectuează cu ajutorul bombe reprezentate în fig. 198, evacuată și umplută cu Hg la 400 kg/cm². La această presiune, se introduce materialul de probă din aparatul de recoltare în bombă, prin inecare de Hg în aparatul de recoltare și prin evacuarea controlată cu atenție a Hg din bombă, pentru a evita scăderea presiunii. Volumul de material de probă introdus este măsurat prin volumul de Hg evacuat din bombă (corectat pentru presiune și pentru temperatură). După umplere, în locul legăturii bombe cu aparatul de recoltare, se cuplează direct pompa-presă la bombă (cu eliminarea aerului din tuburile de legătură).

Se introduce bomba în baia de apă la temperatura stratului și, după atingerea temperaturii și stabilizarea presiunii (fiind necesar

să se descarce puțin bomba pentru compensarea dilatației termice), se repetă determinarea presiunii de saturație, de această dată la temperatura de strat. După aceasta, se determină funcția $P = f(V)_{T_s}$, prin variația volumului (eliminarea de Hg din bombă). Diagrama obținută are alura celei reprezentate în fig. 186.

Pentru rezolvarea problemelor de separare a gazelor în trepte, se poate efectua în mod analog cu ajutorul bombe și al biuretei, studiul eliberării în condiții «de contact» între o presiune oarecare de separator (de exemplu, de înaltă presiune) la care se umple bomba cu lichid saturat cu gaze (eliminându-se excesul nedizolvat, prin deplasarea cu Hg) și presiunea atmosferică. Determinarea se efectuează, de obicei, la temperatura camerei.

Studiul eliberării diferențiale se face în același mod, ca studiul relației P, v, T . Bomba, umplută cu material de probă în condițiile de saturație, este evacuată parțial de mercur în pompa-presă astfel încât presiunea să scadă cu 15–20 at sub presiunea de saturație eliberându-se o parte din gazele din soluție. După agitare și după atingerea echilibrului, se descarcă bomba de gazele eliberate, prin robinetul superior, păstrând constantă presiunea prin inecare de mercur. La terminarea eliminării, care se poate observa printr-o bruscă creștere a presiunii la pompă, se închide robinetul superior, se descarcă din nou, parțial, de Hg bomba și se evacuează din nou gazele eliberate, după stabilizarea temperaturii și a presiunii.

La fiecare reducere a presiunii, se determină volumul fazei lichide rămasă în bombă după evacuarea gazelor, prin diferența dintre volumul calibrat (prealabil) al bombe și volumul de Hg rămas în pompă (după numărul de rotații ale pompei).

Prin colectarea gazelor în biuretă se determină cantitatea și caracteristicile acestora și, prin comparație cu volumul ocupat de faza lichidă la presiunea rămasă, respectiv la presiunea atmosferică finală, se deduce variația coeficientului de volum și a rației de soluție în funcție de presiune.

Aparatura S. L. pentru studiul în condiții de înaltă precizie al legii de stare (P, v, T) și al comporării de fază, voluminoasă și de mînuire delicată, este destinată îndeosebi cercetărilor științifice și, mai puțin, problemelor de exploatare curentă. Gama condițiilor de lucru posibil este $-15^{\circ}\text{C} \dots +238^{\circ}\text{C}$ și $0 - 680,3$ ata cu posibilitățile de măsură: 1) pentru temperatură: sensibilitatea $0,02^{\circ}\text{C}$ uniformitatea $0,05^{\circ}\text{C}$, și eroarea totală maximă (datorită atît neuniformității temperaturii, cît și erorii măsurii) sub $0,1^{\circ}\text{C}$; 2) pentru presiune: sensibilitatea sub $0,015$ kg/cm² la 550 kg/cm² și eroarea maximă sub $0,02$ kg/cm²; 3) pentru volum: eroarea maximă $0,5\%$.

Instalația cuprinde elementele reprezentate schematic în fig. 199.

Celula de echilibru 1 este cufundată în baia de ulei 21 înzestrată cu încălzire electrică, comandată de sistemul termoregulator și înzestrată cu agitatoarele 24. Încărcarea celulei

Controlul și măsura volumului. Volumul total de hidrocarburi este determinat cu ajutorul indicatorului de nivel 5 (fig. 199) sau 1 (fig. 200) prin contact electric cu meniscul Hg. Volumul fazei gazoase respectiv lichide, este determinat de poziția me-

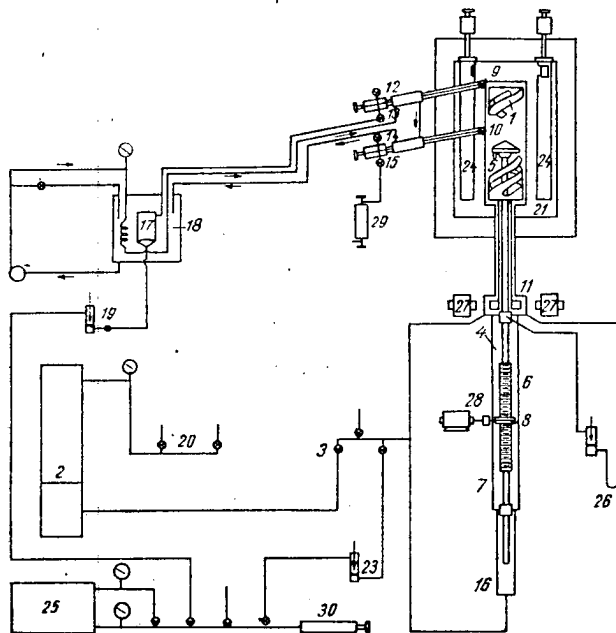


Fig. 199. Schema generală a instalației SL pentru studiul comportării de fază și al relației (P, v, T):

1 — celula de echilibru; 2 — rezervor de Hg; 3 — robinet cu ac; 4 — tija indicatorului de nivel; 5 — indicator de deplasare; 6 — șurub de deplasare a indicatorului de nivel; 7 — tija de compensare; 8 — șurub tangențial; 9 — robinet cu ac; 10 — robinet cu ac; 11 — camera indusului agitatorului magnetic; 12 — robinet de legătură la pompa cu vid; 13 — robinet de legătură la recipientul de încărcare; 14 — robinet de încărcare directă; 15 — robinet de legătură la 29; 16 — cameră de compensație; 17 — recipient de încărcare; 18 — baie de ulei cu termoreglaj; 19 — separator Hg-ulei (tampon); 20 — robinet de refularea cu gaze a Hg; 21 — baie de ulei; 22 — agitator spiral; 23 — separator Hg-ulei (tampon); 24 — agitatoarele băii 21; 25 — balanța de presiune; 26 — separator Hg-ulei (tampon); 27 — inductorul agitatorului magnetic; 28 — numărător de rotații; 29 — recipient de încărcare cu lichide nevolatile; 30 — cilindru compensator.

se face (după ce s-a realizat în ea un vid înaintat cu o pompă de difuziune cu Hg) prin robinetul 12, fie cu gaze din recipientul 17, menținut în baie de ulei cu termoreglaj 18, prin robinetele 13 și 9, fie cu lichide provenite din condensarea de fracțiuni volatile, prin robinetul 14, fie cu lichide nevolatile din recipientul 29, prin robinetul 15. După încărcarea ei cu o cantitate de material de probă, a cărei greutate este cunoscută, se aduce succesiv celula 1 la temperaturile dorite prin reglarea temperaturii respectiv la presiunile dorite prin reglarea presiunii, prin injectare de Hg din 2, urmată, după atingerea echilibrului, de determinarea temperaturii, a presiunii și a volumului ocupat de ansamblu și de fiecare fază, obținându-se astfel legea $F(P, v, T) = 0$ respectiv raportul cantitativ dintre faze, prin puncte.

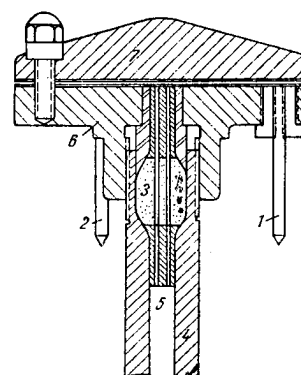


Fig. 200. Detaliu al indicatorului de nivel: 1 — contact pentru meniscul de Hg; 2 — suportul firului de Pt, pentru meniscul gaze-lichid; 3 — garnitură de steatit; 4 — tija indicatorului de nivel; 5 — canalele conductorilor; 6 — corpul indicatorului; 7 — capacul indicatorului.

niscului gaze-hidrocarburi lichide, a cărui poziție este detectată de virful 2 (fig. 200) compus dintr-un conductor electric fix de Pt, orizontal, care, fiind parcurs de un curent foarte slab, are un regim termic determinat de conductibilitatea mediului înconjurător; la atingerea lichidului, datorită conductibilității și căldurii specifice mai mari a acestuia, regimul termic este schimbat, conductorul se răcește și rezistența lui electrică scade. Făcând parte dintr-o ramură a unei conexiuni în punte, schimbarea este observată de la exterior chiar pentru o cufundare în lichid mai mică decât 0,01 mm.

Ridicarea tijei 4 a indicatorului de nivel este comandată de șurubul tangențial 1 reprezentat în fig. 201, care rotește piulița 2. Tija 4, împiedicată de a se roti de pana 3, se deplasează axial. Poziția ei și a indicatorului este cunoscută prin indicația numărătorului de rotații 28 (fig. 199) al șurubului tangențial 1, (fig. 201).

Măsurarea temperaturii este efectuată cu un termometru cu rezistență de Pt montat în baie de ulei 21. Din cauza prezenței unor conductori metalici între celula 1 și exterior este probabilă o diferență de temperatură de ordinul 0,05°C între cea măsurată a băii și cea efectivă a celulei. Un alt termometru asemănător este montat pe o ramură a unei punți, pe care, în caz de abatere a temperaturii

(\pm), o dezechilibrează, provocând devierea oglinzii galvanometrului intercalat pe ramura de curent nul, în sensul corespunzător diferenței de temperatură. Devierea oglinzii provoacă atingerea uneia dintre cele două (după sensul abaterii de temperatură) celule foto-electrice de către un fascicul luminos. Celula excitată comandă printr-un releu electronic variația puterii electrice de încălzire a băii.

Măsurarea presiunii este efectuată cu ajutorul unei balanțe de presiune reprezentată schematic în fig. 202, la care, pentru reducerea frecării pistonului, se ține cilindrul în mișcare de rotație permanentă față de piston (v. fig. 202 și 203). Manevra greutăților din cele trei game ale balanței se efectuează prin comandă mecanică de la exterior. Balanța este racordată la celulă printr-un tub umplut cu un produs petrolier cu viscozitate mică și cu tensiune mică de vapori, prin intermediul vasului-tampon 23.

volumul fazei lichide, volumul fazei gazoase, greutatea probei încărcate, temperatura și presiunea de echilibru. Pe baza acestor date se pot construi curbele de (P, v, T), raportul

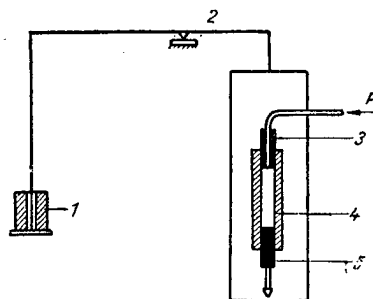


Fig. 202. Schema balanței de măsurare a presiunii: 1 — greutate de echilibrare; 2 — pirghia balanței; 3 — piston perforat (fix) pentru introducerea presiunii; 4 — cilindru rotativ (fig. 199); 5 — pistonul mobil de măsurare.

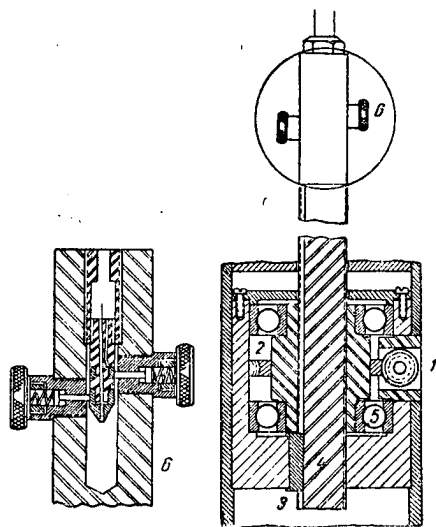


Fig. 201. Detaliu al dispozitivului de măsurare a nivelului, modul de acționare — deplasare: 1 — șurub tangent; 2 — piuliță cu filet exterior tangent (melc); 3 — pană; 4 — tijă indicatorului de nivel; 5 — rulmenți radiali; 6 — detaliu la legăturile conductorilor.

Celula de echilibru are construcția celei reprezentate în fig. 205 (Agitatoarele băii și termometrul nu au fost reprezentate).

Agitatorul spiral 22 (fig. 199 și 205) este rotit prin intermediul tijei tubulare (fig. 205 și 206) de indusul 11 al motorului cu cimp magnetic învîrtitor produs de electromagneții inductori 27.

Pentru compensarea variației de volum în funcție de temperatură, a fluidului care transmite presiunea la balanță, instalația are un cilindru compensator 30.

Aparatura indicată permite determinarea următoarelor mărimi: volumul total al probei,

volumelor celor două faze, compresibilitatea sistemului și coeficientul de volum mono și bifazic (v. fig. 206 și 208).

Un dezavantaj destul de important al aparatului îl constituie incapacitatea de a determina exact contactul cu lichidul al indicatorului de nivel gaz-lichid 2 din fig. 200, în regiunea vecină punctului de început de fierbere (v. fig. 207, lipsă de puncte).

Aparatura laboratorului central Cimpina este concepută pentru a face față necesității de determinare a unui număr cit mai mare de caracteristici ale amestecului studiat și îndeosebi pentru satisfacerea ei în serie, în condiții industriale, într-o singură operație.

Ea permite determinarea volumului sistemului, a volumului fazei lichide, a volumului fazei gazoase, a viscozității fazei lichide, a tensiunii interfaciale dintre faza gazoasă și faza lichidă, a greutății specifice în condițiile atmosferice, a compoziției gazelor eliberate, în funcție de presiune, și a coeficientului de variație al volumului gazelor de la condițiile din celulă la cele atmosferice. Pe baza acestor caracteristici se determină: legea de stare (P, v, T), curbele de eliberare a gazelor (inclusiv punctele inițiale), coeficientul de abatere al gazelor eliberate, de la legea gazelor perfecte etc.

Ea cuprinde o celulă autoclavă de expansiune, manometre pentru controlul presiunii, o baie de apă înzestrată cu dispozitive de încălzire cu termoreglaj și cu termometru de precizie, rețeaua de legătură la pompa de fluide de contrapresiune (glicerină și ulei de ricin), la dispozitivul de încălzire cu material de probă prin transvazare din recipientul de înmagazinare și la aparatura de captare și de analiză a gazelor eliberate, cum și un catotmetru pentru determinarea nivelului meniscului gaze-țigăi (v. fig. 209).

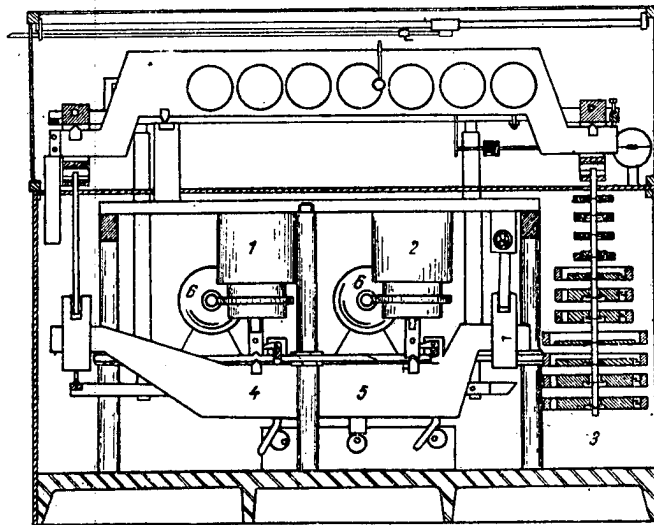


Fig. 203. Balanța de măsurare a presiunii:
1 — cilindru de joasă presiune (gama 0—70 kg/cm²); 2 — cilindru de înaltă presiune (gama 0—700 kg/cm²); 3 — coloană cu greutate; 4 — pișchie de ordinul 1 de sarcini a balanței; 5 — pișchie de ordinul 2 de sarcini a balanței; 6 — electromotoare de rotire a cilindrilor 1 și 2.

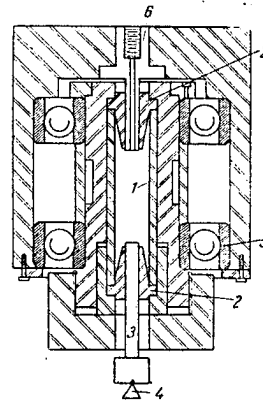


Fig. 204. Detaliu de construcție a cilindrului învîrtor, 1, respectiv 2, din fig. 199:
1 — cilindru; 2 — piese de capăt, conice, calibrate pentru trecerea pistonului; 3 — pistonul activ; 4 — cușitul balanței; 5 — rulmenții radiali; 6 — pistonul pasiv.

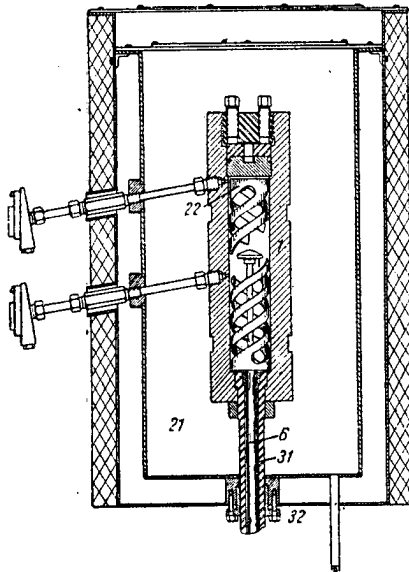


Fig. 205. Celula de echilibru: 31 — tijă tubulară de acționare a agitatorului spiral; 32 — cutie de etanșare de joasă presiune (pentru restul notațiilor v. fig. 195).

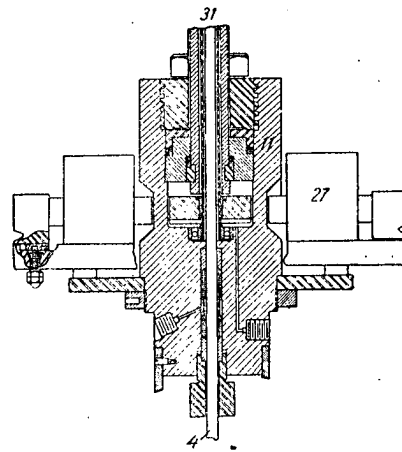


Fig. 206. Dispozitivul de acționare a agitatorului magnetic: 4 — tijă indicatorului de nivel; 11 — camera indușului agitatorului; 27 — indicatorul agitatorului magnetic; 31 — tijă tubulară de acționare a agitatorului.

Celula autoclavă cuprinde trei compartimente: compartimentul 2 destinat probei, completat cu Hg, compartimentul 3 plin cu Hg, cu volum reglabil prin deplasarea pistonului 5 acționat prin roata de mână a șurubului respectiv și compartimentul 10 cu o

Compartimentul 2 are două ferestre de observație opuse, a căror etanșare se realizează, de asemenea, prin deformarea a două rinduri de garnituri între care se injectează glicerină sub o presiune mai mare decât aceea din celulă. Contaminarea probei cu glicerină

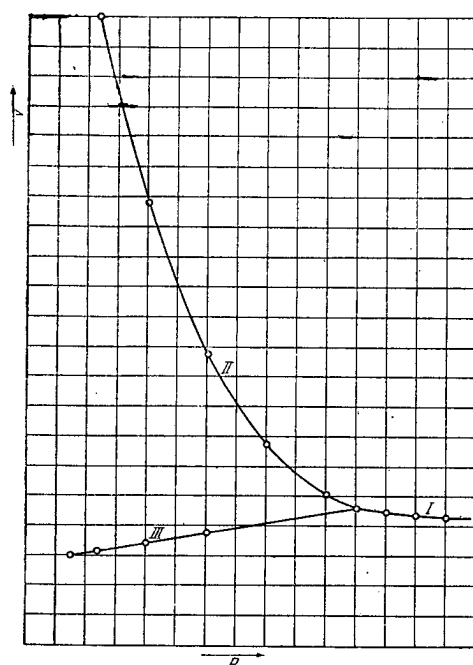


Fig. 207. Diagramă de (P, v, T) și de volume relative ale fazelor pentru un sistem de hidrocarburi cu comportare normală (gaze + gaze):
I — curba de comportare monofazică; II — curba de comportare bifazică; III — curba de volum a fazei lichide; II — III — ordonată corespunzătoare volumului fazei gazoase.

capacitate de circa $2,5-3 \text{ cm}^3$, cuprinzând un volum mort al unei porțiuni de canal dintre robinete, care servește ca picnometru pentru gazele sub presiune. Pistonul poate fi deplasat vertical, iar etanșeitatea lui este asigurată de garniturile respective între care se injectează, prin canalul central al șurubului, ulei de ricin sub presiunea de 1000 kg/cm^2 . Pentru cunoașterea volumului total al celei în funcție de poziția pistonului, roata de comandă a acestuia este divizată în mod corespunzător, dispunându-se de o curbă de calibrare, la construirea căreia se ține seama și de dilatația termică a sistemului și de deformarea lui elastică.

Pentru evitarea deplasării pe distanțe mari în tubulura de legătură, a meniscului apă-Hg, cum și pentru evitarea pierderilor de Hg, compartimentul 2 este în legătură cu vasul tampon 14 care are un manometru independent.

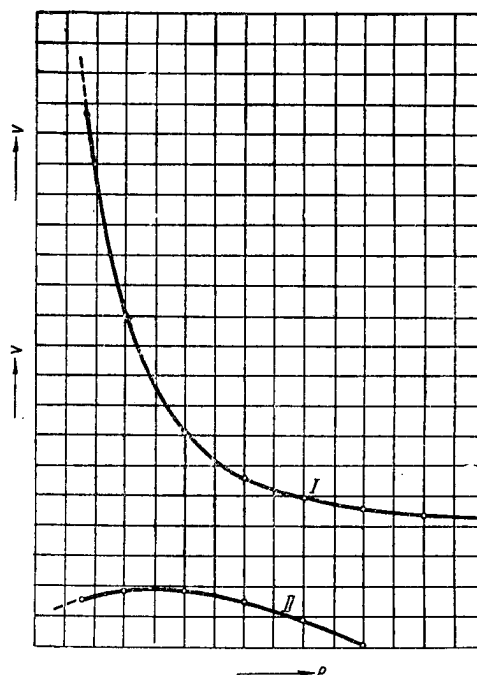


Fig. 208. Comportare de volum și de faze a unui sistem de hidrocarburi care prezintă comportare retrogradă: I — curba volumului total; II — curba volumului fazei lichide.

nu provoacă decât o alterare a volumului calculat al amestecului, pe cînd contaminarea cu ulei de ricin, parțial solubil în sistemul cercetat în condițiile din autoclavă, alterează și proprietățile fizice ale amestecului (viscozitate, tensiune interfacială, coeficient de echilibru etc.).

— Volumul gazelor evacuate este determinat în biuretele 24 prin denivelare cu ajutorul flacoanelor 23 și prin verificarea egalității presiunii de măsurare cu cea atmosferică, cu ajutorul manometrului diferențial 25; gazele sînt apoi colectate provizoriu în vasul 27, de unde pot trece, după uscare, la analiza prin distilare fracționată, la temperaturi joase și la determinarea greutății specifice.

— Măsurarea presiunilor este efectuată cu ajutorul manometrelor 11, dotate fiecare cu cîte două elemente de măsurare și cu două indicatoare, a căror verificare se efectuează la intervale frecvente prin comparația cu indicațiile unui manometru cu greutate. Pentru a compensa variația de volum a celei pe care

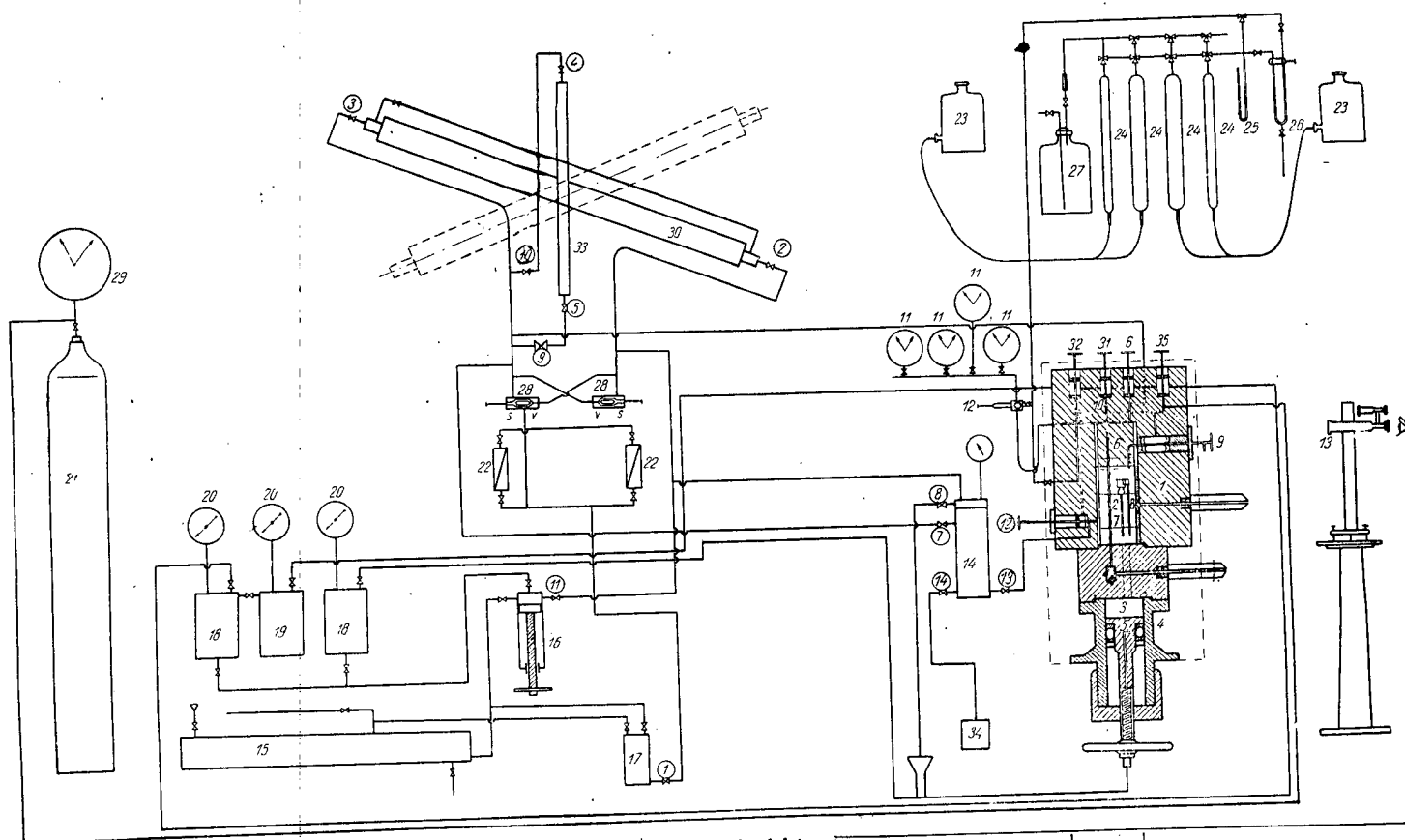


Fig. 209. Schema de ansamblu a instalației pentru studiul probelor de fund cu ajutorul celei de expansiune (L.C.C.S.):

1 — corpul celei; 2 — compartimentul de probă; 3 — compartimentul 1 cu Hg pentru realizarea variației volumului compartimentului 2; 4 — baie de apă; 5 — piston pentru variația volumului; 6 — agitator; 7 — viscosimetru; 8 — tensiometru; 9 — dispozitiv de recoltat probe; 10 — celula mică pentru determinarea coeficientului de abatere de la legea gazelor perfecte; 11 — manometre; 12 — compensator de volum; 13 — catetometru; 14 — vas-tampon, separator apă-Hg; 15 — rezervor de apă distilată; 16 — pompă-presă de şurub; 17 — vas-tampon, separator aer-apă; 18 — vas de alimentare cu ulei de ricin; 19 — vas de alimentare cu glicerină; 20 — manometre de înaltă presiune (1000 at) pentru rețeaua de fluide de etanșare; 21 — butelie cu hidrogen pentru etalonarea celei 10; 22 — pompe de transvazare; 23 — vas de colectare a gazelor eliberate; 24 — biurete pentru captarea și pentru analizarea gazelor eliberate; 25 — manometru; 26 — debitmetru cu capilar (pentru măsurarea debitului gazelor eliberate); 27 — flacon de colectare a gazelor eliberate; 28 — inversor de circulație a dispozitivului de transvazare; 29 — manometrul buteliei cu hidrogen; 30 — tub de înmagazinare; 31 — încărcarea celei 10; 32 — descărcarea celei 10 și eliberarea gazelor; 33 — biureta de măsurare la transvazare; 34 — vas de colectare; 35 — robinet pentru legătura la butelia cu hidrogen sau la pompa de vid.

Cifrele încercuite din figură reprezintă robinetele a căror comandă rezultă din schemă V, respectiv S, simbolizează poziția de închidere a inversorilor, cu virful, respectiv cu spatele. Robinetele care nu figurează în schema de comandă nu interesează operația respectivă. Schema de comandă a robinetelor = închis; d = deschis. Robinetul 14 stă, în mod normal închis.

Operația	Inversori		Robinetele												
	I	II	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Transfer din 30 în 1.....	V	V	i	d	d	i	d	d	i	i	i	i	d	d	
Transfer din 1 în 30....	S	S	i	d	d	i	d	d	i	i	i	i	d	d	
Transfer din 30 în 33....	V	V	i	d	d	d	i	i	d	d	i	i	i	i	
Transfer din 33 în 30....	S	S	i	d	d	d	i	i	d	d	i	i	i	i	
Transfer din 27 în 1....	S	V	i	i	i	i	d	d	i	i	i	i	d	d	
Transfer din 1 în 27....	V	V	i	d	d	i	i	i	i	i	i	i	i	i	
Transfer din 33 în 27....	V	V	i	d	d	i	i	d	i	i	i	i	i	i	
Comprimarea gazelor în 33	S	S	d	i	i	d	i	i	i	i	i	i	i	i	
Comprimarea gazelor în 30	V	V	d	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	
Comprimarea gazelor în 27	V	V	d	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	

o produc deformările elementelor de măsurare ale manometrelor, acestea sînt legate la celulă prin intermediul unui vas compensator, în care, cu ajutorul unui șurub, se poate introduce mai mult sau mai puțin, un piston de compensare. Vasul comparator are o fereastră de control pentru aducerea la reperul de referință a meniscului care separă Hg (care face legătura cu celula) de uleiul de ricin (care umple elementele de măsurare ale manometrelor). Înlăturarea oricărei bule de aer din sistem este absolut necesară. Din cauza marii viscozități, respectiv a tensiunii superficiale a fluidelor din compensator, ferestrele nu necesită etanșarea cu garnituri duble și cu fluid sub presiune superioară aceleia din celulă, necesare la celelalte legături ale celelei.

Măsurarea temperaturilor se efectuează cu ajutorul termometrului de precizie al băii, după stabilizare.

Măsurarea volumelor vaselor se efectuează prin determinarea cu catetometrul a nivelului meniscului gaze-țiței și, în funcție de acesta, cu ajutorul curbei de etalonare se determină volumul ocupat de gaze, respectiv de lichid.

— Măsurarea viscozității fazei lichide se efectuează cu ajutorul unui viscozimetru special, cu dimensiuni mici, cu bulb și cu capilar. În mod normal, el se găsește cufundat în lichid, iar în momentul determinării, prin acțiunea unui dispozitiv electromagnetic nereprezentat în fig. 208, el este ridicat pînă în zona de gaze. Ținînd seama de diferența dintre greutatea specifică a fazei lichide și a fazei gazoase, de înălțimea coloanei de lichid din viscozimetru, de caracteristicile geometrice ale capilarului viscozimetruului (verificate prin determinări la condițiile atmosferice) și de durata de golire a volumului de lichid cuprins între două repere (în bulb) se determină viscozitatea dinamică a fazei lichide.

Tensiunea superficială este determinată cu ajutorul unui tensiometru cu ascensiune capilară, compus dintr-un capilar care poate fi ridicat din lichid în același mod ca și viscozimetruul.

Din cauza riscurilor de aderență în capilare a materialului solid sau a emulsiei prezente eventual în probe, indicațiile viscozimetruului pot fi alterate. Din cauza prezenței de apă (fie din strat, fie provenită de la operațiile de transvazare) în materialul probei, cum și a unor mici cantități de compuși heteropolar, umezirea suprafeței interne a tensiometruului nu se face uniform, iar rezultatele măsurării nu sînt totdeauna reproductibile. Pentru ameliorarea condițiilor de lucru, celula are două fire fixe de Pt care desfundă capilarele viscozimetruului și ale tensiometruului, cînd acestea sînt deplasate la capătul inferior al cursei.

— Modul de lucru. Încărcarea aparatului se face cu ajutorul dispozitivului reprezentat în fig. 175 (completat, pentru aceasta, v. fig. 208), în mod asemănător cu cel din cazul

încărcării recipientelor de înmagazinare, cu singura deosebire că țițeiul care este introdus în celulă nu deplasează apa (a cărei prezență aici trebuie evitată), ci Hg. Afară de procedeul indicat, la care circuitul pompelor este închis, se mai folosește încărcarea în circuit deschis, la care, deși controlul presiunii trebuie făcut cu mai mare atenție, controlul procesului de umplere este înlesnit, iar eventualele bule de aer sînt înlăturate mai ușor. În acest caz, pompele 28 trag apă din 17 și refulează țițeiul din 30 în 2, de unde mercurul deslocaut de țiței prece în 14, deslocaut o cantitate de apă care se colectează și se măsoară în 34, urmărindu-se astfel procesul de umplere.

După umplere, se aduce celula în situația inițială de probă la temperatura stratului și la o presiune sensibil superioară presiunii de început de fierbere, pentru asigurarea stării monofazice. După atingerea echilibrului de temperatură și de presiune, volumul total al celelei se mărește treptat cu ajutorul pistonului. După fiecare sporire, se observă presiunea și temperatura, se notează valorile stabilizate.

Pentru atingerea echilibrului sînt necesare durate mici la începutul operației, (cîteva minute) care cresc cu decomprimarea; pentru scurtarea lor, conținutul celelei este agitat cu agitatorul spiral 6, a cărui acționare nu necesită o transmisie exterioară (la ultimul model de autoclavă acționarea se face electromagnetic, cu ajutorul unui dispozitiv analog celui reprezentat în fig. 206). Datorită acestei agitări, durata de echilibrare către sfîrșitul operației poate fi redusă la cîteva zeci de minute.

Prin construcția lui, aparatul nu permite o eliberare pură « de contact », nici una « diferențială ». Volumul limitat al celelei nu permite păstrarea în contact cu țițeiul a gazelor eliberate, pînă la presiune joasă. Din această cauză, eliminarea treptată a gazelor eliberate se începe încă de la presiunile înalte.

Fiind în faza inițială o eliberare de contact și în faza finală una care se apropie din ce în ce de cea diferențială, eliberarea este, în ansamblu, mixtă, cum este, de altfel, și aceea din procesul de exploatare.

Determinarea legii (P, v, T). Înregistrarea rezultatelor privind presiunea, temperatura și volumul total permite construirea de diagrame similare celor prezentate în fig. 210.

Determinarea punctului de început de fierbere prin intersecția celor două ramuri de curbă reprezentate prin drepte apropiate lor FL și FG , constituie numai o aproximație comodă. În fapt, cele două ramuri ale curbei reale au o curbă sensibilă (v . curba punctată), mai ales în apropierea punctului de început de fierbere, care este, mai exact, situat în regiunea F' .

Înregistrarea rezultatelor privind presiunea, temperatura și volumul fazei lichide permite determinarea mai exactă a presiunii de început

de fierbere, datorită intersecției a două curbe sub un unghi mai mare (fig. 211).

Determinarea rației de soluție și coeficientului de volum al fazei lichide. Înregistrarea volumului cumulativ de gaze eliberate, reduce la

relația: $b_t = 1 + \frac{G_s}{400}$ (destul de apropiată

de realitate pentru amestecurile de hidrocarburi produse în R.P.R.), în care, b_t este coeficientul de contracție (pe această ramură a

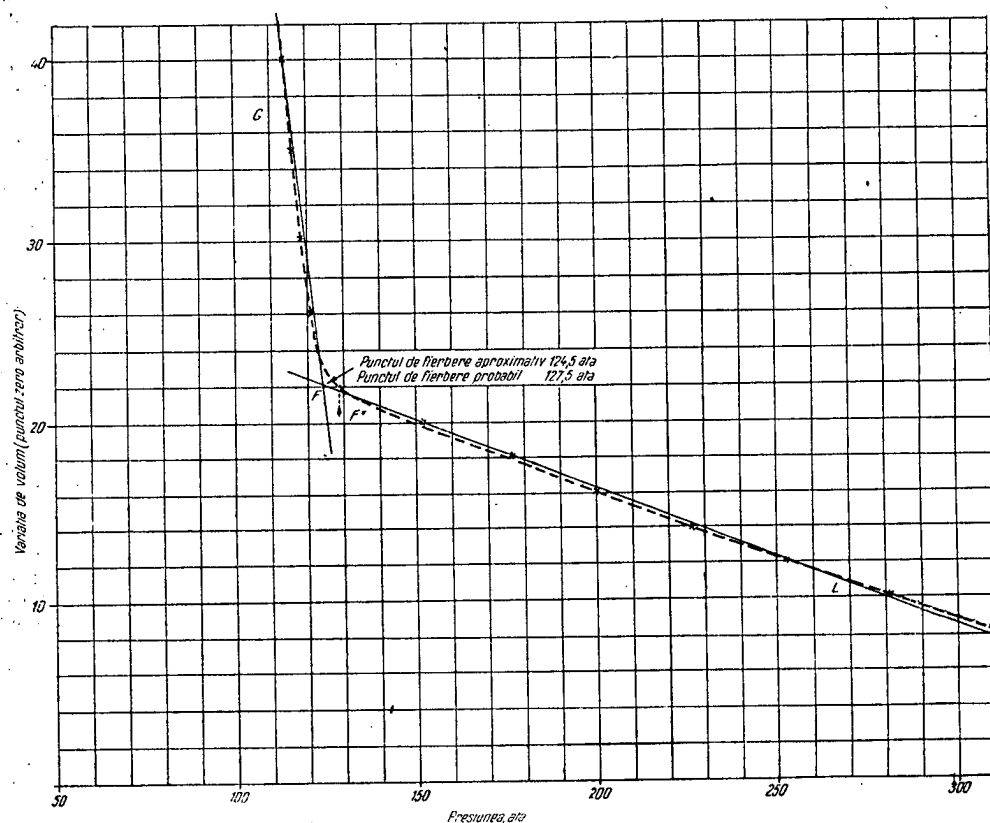


Fig. 210. Diagrama variației volumului total al probei în funcție de presiune. Legea (P, v, T) exprimată sub forma $v = f(P)_T$, în gama de presiuni corespunzătoare eliberării de contact:

- FL — variația aproximativă a volumului fazei lichide;
- FG — variația aproximativă a volumului amestecului țigui + gaze.
- — — variația probabilă a volumului sistemului;
- F — poziția aproximativă a punctului de început de fierbere;
- F' — poziția probabilă a punctului de început de fierbere.

condițiile standard, permite, prin diferența dintre valoarea finală ($P = 1$ ata) și cea curentă a acestei mărimi și prin raportarea acestei diferențe la unitatea de volum de țigui final, să se deducă rația de soluție, exprimată, de obicei, în m^3 N gaze/ m^3 țigui, mai rar în m^3 N/t (fig. 212).

Suprapunerea curbilor din fig. 210 și 211 determină curbe de ansamblu de natură celor reprezentate în fig 207.

Paralelismul dintre curbele FO reprezentate în fig. 211 și 212 a făcut să se propună deducerea factorului de volum (contracție), b_t , indirect, pe baza rației de soluție, folosind

curbei, el coincide cu coeficientul de volum); G_s — rația de soluție în m^3 N/ m^3 , ambele mărimi fiind funcții de P .

Determinarea coeficientului de abatere al gazelor de la legea gazelor perfecte se efectuează înainte de fiecare evacuare de gaze prin izolarea în celula mică 10 (fig. 209), a circa 2,5–3 cm^3 gaze (închizându-se robinetul 31); apoi, prin deschiderea robinetului 32, gazele astfel izolate se destind pînă la presiunea (apropiată de cea atmosferică) din una dintre biuretele 2, în care gazul este colectat și măsurat. Raportu dintre volumul astfel măsurat, corectat pentru

încărcarea cu vapori de apă din biuretă și pentru spațiul mort alcătuit din volumul celulei 10 și al tubului de captare, pe de o parte, și volumul celulei 10 multiplicat cu raportul dintre presiunea de la care s-a recoltat

gazul din autoclavă și presiunea de măsurare în biuretă, pe de altă parte, este egal cu coeficientul de abatere multiplicat cu raportul dintre temperatura de recoltare în 10 și aceea de măsurare în 24. Volumul celulei 10 fiind

mic, este necesar ca el să fie determinat cu exactitate, cât mai frecvent. Operația se realizează fie prin etalonare cu H , al cărui coeficient Z este cunoscut (v. tabela 2), fie prin următorul artificiu. Cu robinetul 31 închis, se deschide 35 și se face un vid cât mai înaintat în celula 10. După închidere, din celula 2, în prealabil încărcată la o presiune P_1 , se lasă să treacă prin 31 în 10 cantitatea de gaz corespunzătoare stabilirii echilibrului de presiuni între 10 și 2, presiunea scăzând până la P_2 ; cu ajutorul pistonului 5 se comprimă conținutul celulei 2 până când presiunea lui atinge din nou P_1 . Variația de volum produsă de piston și citită la indicatorul pistonului este egală cu volumul celulei 10.

Determinările de această natură, permit construirea de curbe de forma acelor reprezentate în fig. 213 și fig. 207, după temperatura de zăcămint și după natura gazelor.

Determinarea greutateilor specifice ale fazei gazoase sub presiune, se efectuează cu relația

$$\gamma = \gamma_0 \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{Z}$$

în care:

γ este greutatea specifică a gazelor sub presiune;

γ_0 — greutatea specifică a gazelor în condițiile normale, măsurată cu efuziometrul din 27;

T și P — temperatura, respectiv presiunea de investigație;

$T_0 = 273,12^\circ\text{K}$ și

$P_0 = 1 \text{ ata}$.

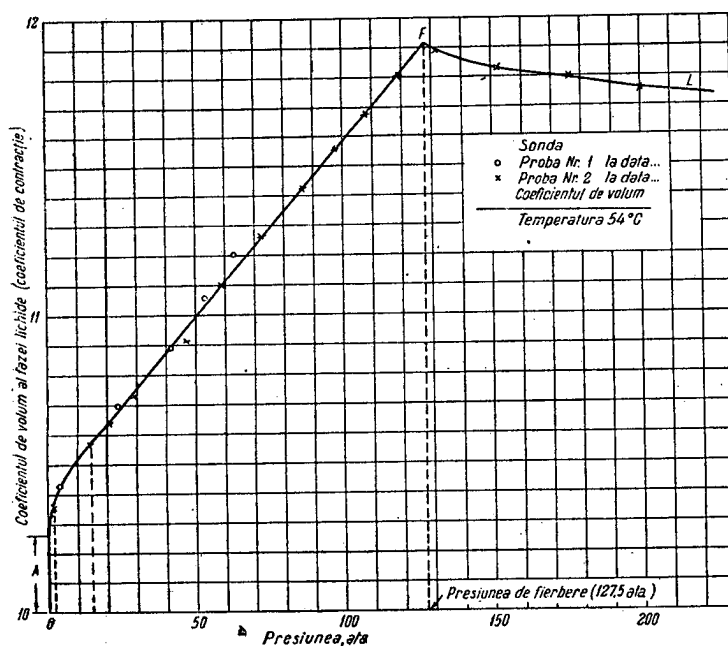


Fig. 211. Diagrama variației volumului fazei lichide a unei cantități de probă care în faza finală, în condițiile atmosferice, prezintă un volum al fazei lichide, egal cu unitatea (curba coeficientului de volum al lichidului):

F — punctul de început de fierbere;
FL — ramura curbei de volum al fazei lichide în stare monofazică, domeniul de saturație;
FO — ramura curbei de volum al fazei lichide în stare bifazică;
A — contracție finală datorită răcirii (la presiunea atmosferică) de la temperatura de zăcămint la aceea a camerei.

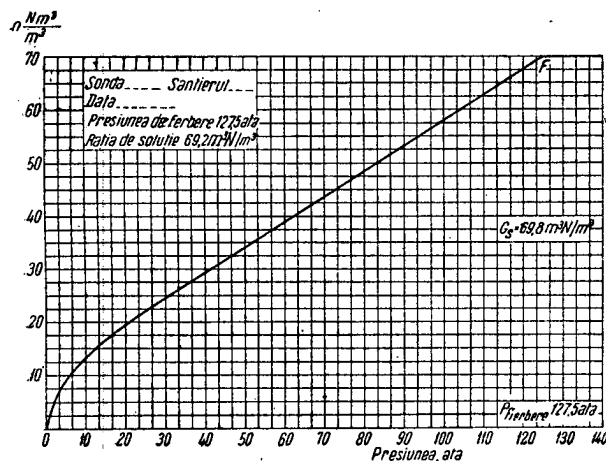


Fig. 212. Variația ratei de soluție în funcție de presiune:

FO — regiunea de saturație (bifazică);
FL — regiunea de saturație (monofazică).

Ea se poate verifica prin calcul, după analiza gazelor.

Determinarea greutăților specifice ale fazei lichide se efectuează adunând la greutatea țiteiului remanent final, greutatea calculată a gazelor în soluție în momentul cercetat și împărțind suma prin volumul efectiv al fazei lichide în același moment determinat prin citirea nivelului cu catetometrul. Reprezentarea în funcție de presiune a greutăților specifice ale ambelor faze în echilibru dă curbe asemănătoare aceloră din fig. 214 (fracțiune a fig. 114).

Determinarea viscozității (v. și măsura pag. 186) în funcție de presiune, indică o creștere simțitoare a ei la scăderea presiunii, îndeosebi în gama presiunilor joase. Ea este deseori eronată din cauzele menționate: apă, nisip, emulsie, ulei de ricin, fragmente de cauciuc macerat din garnituri, oxizi de fier (rugină) etc., pe care firul de Pt nu le înalătură totdeauna.

Alura curbelor obținute este reprezentată în fig. 215.

Determinarea tensiunii superficiale (v. și măsura pag. 186) funcție de presiune indică o variație destul de asemănătoare cu aceea a viscozității, cu deosebirea că variația ei nu este concentrată în gama presiunilor joase, ci este mai uniform răspândită pe întreaga scară a presiunilor investigate. La presiuni mai mari, în apropierea celor critice, tensiunea superficială (în aceste condiții este mai exactă denumirea de interfacială) tinde către zero, valoare pe care o atinge în punctul critic. Spre deosebire de viscozitate se observă o variabilitate într-o gamă mult mai restrânsă, din cauza naturii țiteiului; acest fapt se datorește împrejurării că concentrația în diferiții componenți ai sistemului poate fi, în zona suprafețelor (la o distanță mai mică decât așa numita rază de acțiune moleculară) cu totul alta decât cea medie, mai ales în ce privește microcomponenții. Prin aceasta concentrațiile respective sînt întrucîtva mai apropiate de cele ale fazei gazoase, de unde și variabilitatea mai restrînsă a lor (v. fig. 216).

Determinarea greutății specifice, în condițiile normale, a fazei gazoase se efectuează cu ajutorul

efuziometrului pe baza inversei proporționalității dintre greutatea moleculară (respectiv specifică) a două gaze și rădăcinile pătrate ale duratelor de scurgere în aceleași condiții de temperatură și de presiune, printr-un orificiu

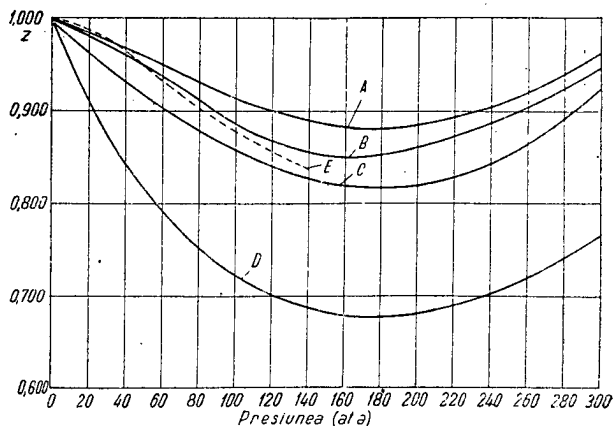


Fig. 213. Variația în funcție de presiune, la temperatura de zăcămint, a coeficientului de abatere, Z, de la legea gazelor perfecte:

- A — zăcămintul A Meoșian II, + 74,5 °C;
- B — zăcămintul B Meoșian II, + 80 °C;
- C — zăcămintul C Meoșian II, + 45 °C;
- D — zăcămintul D Meoșian I, + 71 °C;
- F — zăcămintul F Meoșian, + 38 °C.

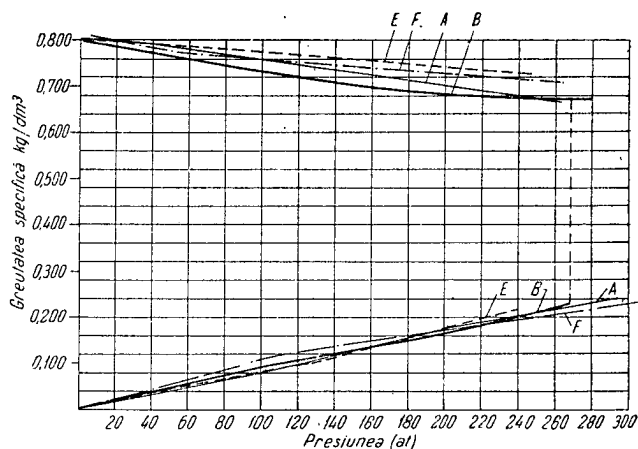


Fig. 214. Comparația variației greutății specifice a fazei lichide și a fazei gazoase, în echilibru, în funcție de presiune:

- A — zăcămintul A Meoșian I, + 63 °C;
- B — zăcămintul B Meoșian II, + 62 °C;
- E — zăcămintul E Meoșian, + 36 °C;
- F — zăcămintul F Meoșian, + 57 °C.

calibrat, de preferință printr-o membrană. Metoda se aplica de obicei prin comparația cu aerul. Deși mai puțin exactă decât metoda picnometruului, această metodă este mai directă și mai rapidă și nu necesită nici aparatură de precizie (STAS 1310-50). Ea prezintă și avantajul de a fi adaptabilă la microanalize.

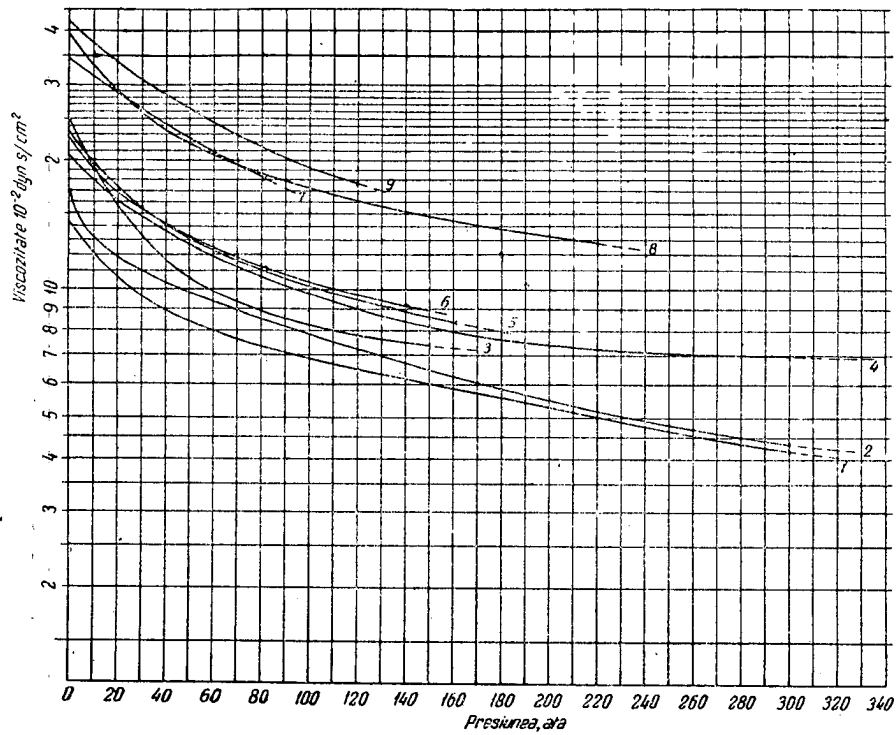


Fig. 215. Curbele de variație a viscozității dinamice în funcție de presiune la temperatura de zăcămint, în condiții de saturație cu gazele pentru câteva țipeiuri din R.P.R.

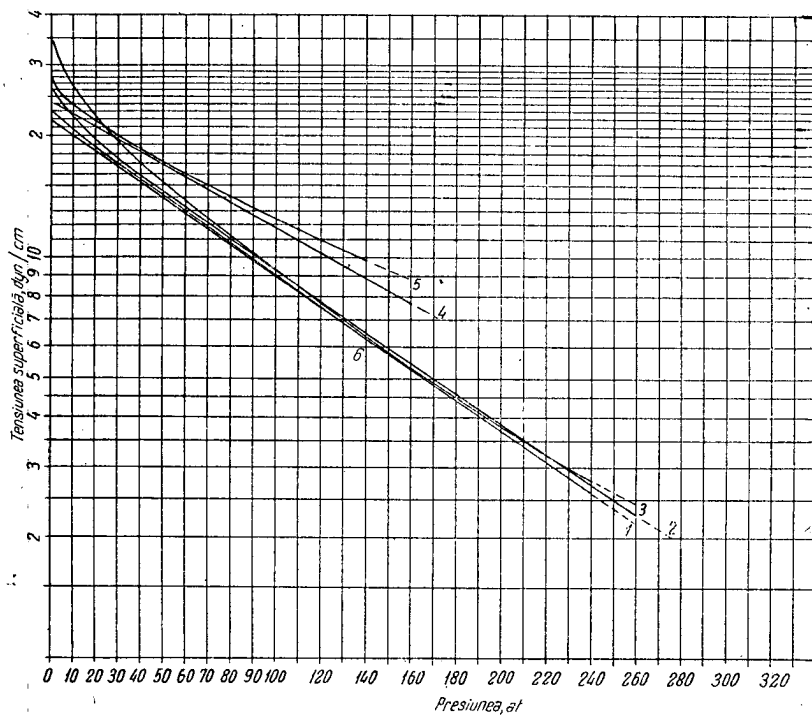


Fig. 216. Curbele de variație a tensiunii superficiale a citorva țipeiuri din R.P.R., saturate cu gaze la temperatura de zăcămint în funcție de presiune.

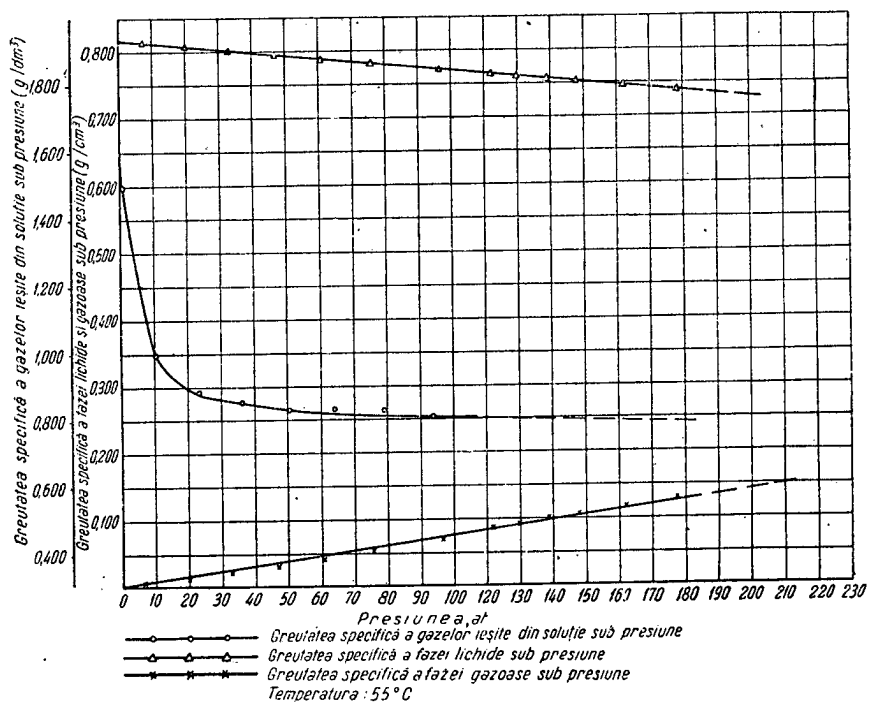


Fig. 217. Variația greutatei specifice a ultimei cantități de gaze eliberate din soluție în funcție de presiune.

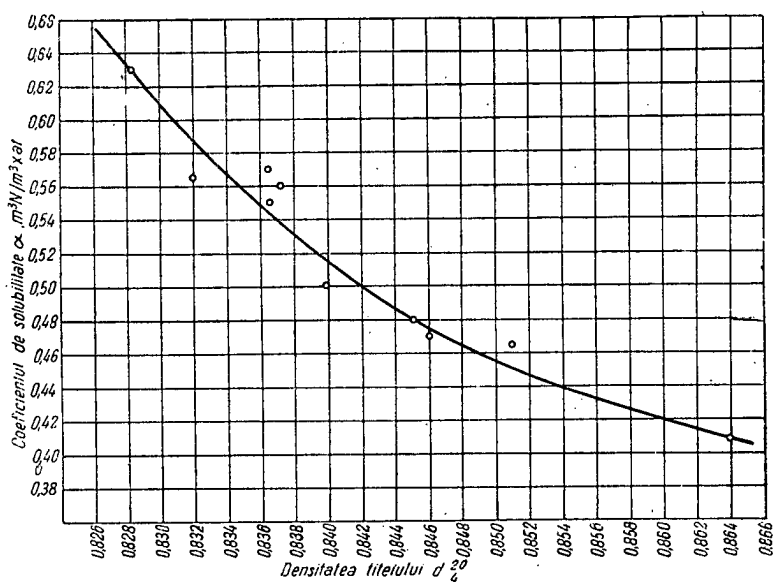


Fig. 218. Variația coeficientului mediu la solubilitate al unui gaz sărac, în țitei, în funcție de greutatea specifică normală a țiteiului d_4^{20} .

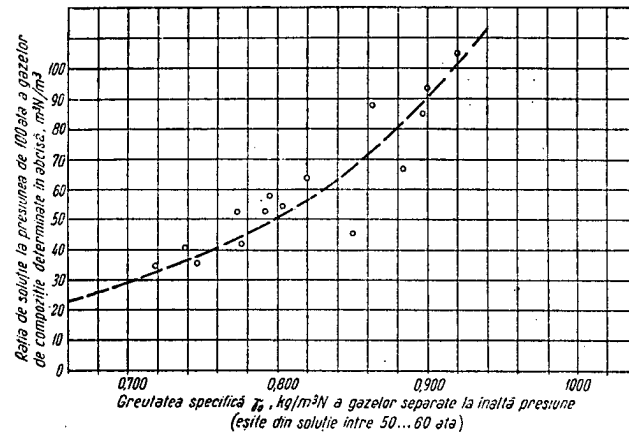


Fig. 219. Variația rației medii de solubilitate a gazelor de sondă în țițeiuri medii, în funcție de greutatea specifică normală a gazului.

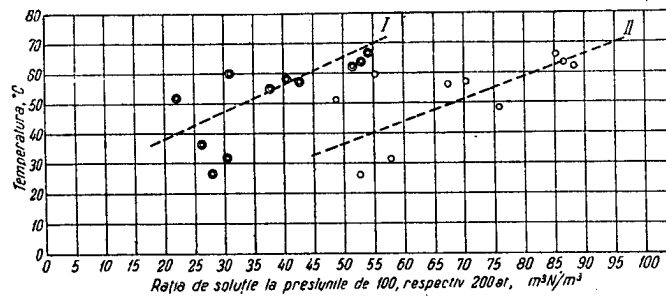


Fig. 220. Relația dintre temperatură și rația de soluție (după Dr. Szasz):
I — la 100 ata; II — la 200 ata., indicații statistice, de valoare redusă.

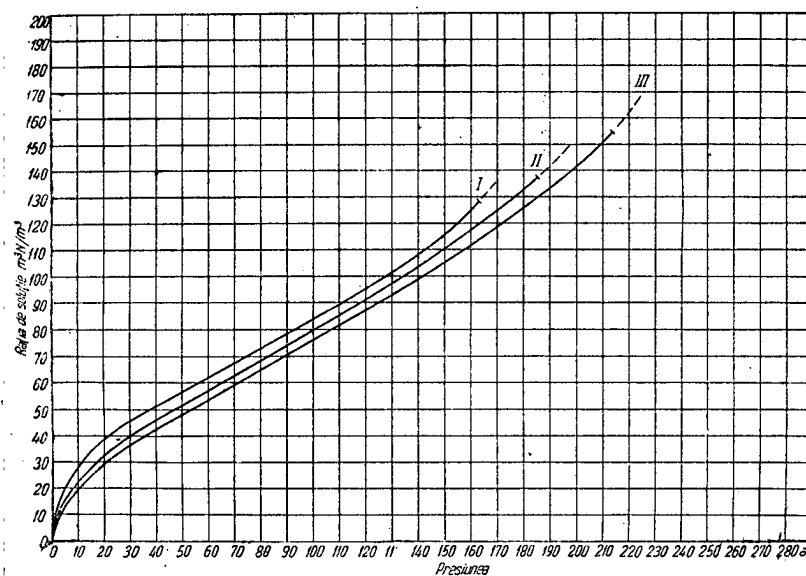


Fig. 221. Relația dintre temperatură, rația de soluție și presiune, încercări cu același material:
I — la 323 °K = 50 °C; II — la 343 °F = 70 °C și III — la 353 °F = 80 °C.

Variația în funcție de presiunea compoziției ultimei cantități de gaze eliberate din soluție. Această compoziție are o variație foarte redusă: de la cele mai mari presiuni până la 50–30 at, compoziția gazelor eliberate este practic constantă (metan, puțin etan și eventualele urme de așa numite gaze permanente și de alcani mai grei).

De la presiuni de ordinul 50–30 at în jos se degajă în cantități sensibile alcanii superiori, treptat, în ordinea greutății moleculare respective, în ordinea inversă a valorilor coeficienților de echilibru (v. fig. 217).

Cîteva relații între diferitele caracteristici fizice ale amestecurilor gaze-țitei (tentative de

generalizare, din experiența Laboratorului Central Cîmpina al S.R.P.).*)

Relația dintre coeficientul mediu de solubilitate al unui gaz sărac în țitei și greutatea specifică în condiții normale a țiteiului este reprezentată în fig. 218.

Relația dintre rația de soluție într-un țitei mediu a unui gaz de compoziție variabilă și greutatea specifică normală a gazului (media întregii cantități de gaze) este reprezentată în fig. 219. Punctele experimentale sînt întrucîtva împrăștiate și din cauza unei oarecari variații a naturii țiteiului experimentat.

Relația dintre temperatură și rația de soluție este mai puțin studiată în condiții uniforme. După Dr. Szass, ea ar fi cea reprezentată în fig. 220 și 221.

*) Materiale disponibile la data elaborării prezentei lucrări (1951-52).

BIBLIOGRAFIE

- BROD I. O.: Zăcămintele de țitei și gaze — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1951.
 CRÎLOV A. P. și MURAVIEV I. M.: Exploatarea zăcămintelor de țitei — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1949.
 CRÎLOV A. P. ș.a.: Bazele științifice ale exploatării zăcămintelor de țitei. Moscova, Editura Tehnică de Stat, 1948.
 FASTOVSKI V. G.: Metanul — Moscova. — Editura Tehnică de Stat, 1947.
 CRICEVSKI I. R.: Echilibre de fază în soluții — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1952.
 DAHNOV V. A.: Prospeccțiunea electrică a zăcămintelor de țitei. — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1951.
 GAZIEV G. N. și CORHANOV I. I.: Exploatarea zăcămintelor de țitei — Bacu. Editura tehnico-științifică pentru literatura petrolului și combustibililor minerali, 1950, partea I-a.
 GOROIAN V. I.: Metode de cercetarea straturilor petrolifere — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1947.
 MAXIMOVICI G. K.: Metode moderne de studiu proprietăților straturilor petrolifere. — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1947.
 MAXIMOVICI G. K.: Proprietățile straturilor petrolifere — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1949.
 MAXIMOVICI G.K. și APELTIN I.E.: Pregătirea apei pentru injectarea în stratele petrolifere — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1952.
 MIRCINC M. F.: Geologia industrială a petrolului — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1946.
 NAGHIEV M. F.: Calcule termodinamice ale proceselor de prelucrarea țiteiului și date asupra reacțiilor lor chimice. Bacu-Leningrad — Editura Tehnică de Stat — Secțiunea din Azerbaigian, pentru literatura industriei țiteiului și combustibililor minerali, 1950.
 POPOVICI I. V.: Teoria cinetică atractivă a lichidelor și vaporilor — București. Teză de doctorat, « Școala Politehnică » din București, 1943.
 SULIN V. A.: Apele zăcămintelor de țitei în sistemele acvifere naturale — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1946.
 SCELKACEV V. N. și LAPUK V. B.: Hidraulica subterană — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1949.
 VNII GAZ.: Probleme de extracție, transportul și prelucrarea gazelor naturale. — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1951.
 VUKALOVICI M. P. și NOVIKOV I. I.: Ecuațiile de stare ale gazelor reale.
 MUSKAT M.: Principiile fizice ale extracției țiteiului — New-York. Mc. GH, 1949.
 *** Manualul inginerului — București. Editura AGIR, 1947.
 *** Manualul chimistului — București. Editura AGIR, 1948.
 *** Manualul inginerului chimist — București. Editura Tehnică, vol. I 1951, vol. II 1952.
 Colecția revistei Neftianoe Hoziaistvo 1946—1948.
 Dări de seamă ale Academiei de Științe a U.R.S.S. (I.I.A.H. C.C.C.P.) colecția 1948—1952.
 Colecția revistei Industrial and Engineering Chemistry 1930—1940.
 Colecția revistei Za ekonomiu toplivo 1946—1951.
 Colecția buletinelor anuale Petroleum Development and Technology, 1930—1940.

BIBLIOGRAFIE

(recomandată, ulterioară elaborării capitoului)

- STEFĂNESCU R. A.: Metode de recuperare secundară a țiteiului — București. Editura Tehnică, 1952.
 BOLENTIEV, F. A.: Constante fizice ale hidrocarburilor, combustibililor lichizi și uleiurilor — Moscova. Editura Tehnică de Stat.
 TILICEVA M.D. ș.a.: Proprietățile fizico-chimice ale hidrocarburilor individuale — Moscova. Editura Tehnică de Stat, 1953.
 Colecția revistei Neftianoe Hoziaistvo 1954—1955
 Dări de seamă ale Academiei de Științe a U.R.S.S. (I.I.A.H. C.C.C.P.) 1952—1955.
 IOACHIM GR. Extracția țiteiului — Editura Tehnică, București 1955
 GOLDFRACHT TH. Probleme de hidraulica subterană — Editura Tehnică, București, 1955.

CAPITOLUL V

**FIZICA ZĂCĂMINTELOR DE ȚITEI ȘI GAZE
FENOMENE DE GOLIRE A ZĂCĂMINTELOR SUB ACȚIUNEA
FACTORILOR NATURALI**

**A. PRESIUNEA DIN ZĂCĂMINTELE
DE ȚITEI ȘI DE GAZE**

a. Originea presiunii

Originea presiunii în zăcămintele de hidrocarburi o constituie cimpul gravitațional terestru, care acționează prin greutatea rocilor care acoperă zăcămintul (în sensul larg: zona petroliferă, acviferă sau gazeiferă) și prin greutatea fluidelor care saturează aceste roce, în general, apa. Într-un fluid perfect, în echilibru, distribuția presiunilor în jurul unui punct este uniformă, iar suprafața care o reprezintă în funcție de direcție prin raza vectorie, este o sferă. În roce care pot rezista unor forfecări finite, repartiția presiunilor în jurul unui punct se poate reprezenta printr-un elipsoid cu axa maximă, în general verticală; valoarea semiaxei elipsoidului corespunde unei presiuni litostatice care este dată de greutatea coloanei de roce suprapuse. Valoarea acestei presiuni interesează practic în operațiile de injectare în strat (fluide pentru menținerea sau pentru refacerea presiunii, pentru exploatare secundară sau pentru injectare de agenți de etanșare, lapte de ciment, rășini plastice, etc.) și poate fi determinată cu relația

$$P_v = \gamma_r H \quad (1)$$

în care:

- P_v este presiunea după verticala punctului considerat, în kg/m^2 ;
- H — adâncimea punctului considerat, în m;
- γ_r — greutatea specifică medie a rocilor acoperitoare, în kg/m^3 .

În general, γ_r crește cu adâncimea, astfel încât valoarea medie este de ordinul 1 800—2 000 în rocele de suprafață, ajungând până la 2 400—2 600 la adâncimi de 2 000—3 000 m. Dacă se dispune de informații petrografice asupra profilului rocilor acoperitoare, se poate

calcula γ pe porțiuni de γ constant (formațiuni) cu relația:

$$\gamma = (1 - m) \gamma_b + m \sum S_i \gamma_i \quad (2)$$

în care:

- γ este greutatea specifică locală a rocei, în kg/m^3 ;
- m — porozitatea rocei, fracțiune subunitară;
- γ_b — greutatea specifică medie a elementelor minerale ale rocei, în kg/m^3 ;
- S_i — saturația rocei cu fluidul i , fracțiune subunitară din spațiul de pori;
- γ_i — greutatea specifică a fluidului i , în kg/m^3 .

În practică, în lipsa datelor necesare pentru relația (2), se recomandă să se ia $\gamma_r = 1,800$ — $2,000$ pentru intervalul $H = 0$ — $1,000$; $\gamma_r = 2,000$ — $2,200$ pentru intervalul $H = 0$ — $2,000$ și $\gamma_r = 2,200$ — $2,400$ pentru intervalul $H = 0$ — $3,000$, sau să se determine experimental, prin operații de fisurare hidrolică, atunci cînd aceasta este cu putință, valoarea lui P_v (în realitate $P_v - \sigma_t$, unde σ_t este rezistența la rupere prin tensiune a rocei, în general, neglijabilă în comparație cu P_v , atît prin valoarea ei mică, cît și prin faptul că fisurarea se produce în formațiunea cu cea mai mică σ_t).

Valoarea de echilibru a presiunii rocilor după direcțiile orizontale, P_h , în același punct, este mai mică și este determinată de calitățile elastice-plastice ale rocei. Ea prezintă interes pentru stabilitatea găurii de sondă netubate și pentru dimensionarea coloanelor (v. vol. I). Ea crește cu adâncimea, este totdeauna superioară *) presiunii hidrostatice și are valori care oscilează între cele corespunzătoare unei coloane de fluid de densitate 1,2—1,8.

*) Valoarea de echilibru în timp, cu excepția rocilor capabile de a suporta importante tensiuni de forfecare-alunecare; chiar și în acest caz, excepția este temporară.

În fluidele în echilibru, care saturează porii rocei, presiunea este, la scară macroscopică, uniformă, iar valoarea ei în fiecare punct este determinată de un cîmp al cărui gradient este vertical și are în fiecare punct o valoare egală cu greutatea specifică a fluidului din acel punct. Valoarea locală a presiunii corespunde în general, în zăcămintele de hidrocarburi, celei hidrostatice. Se obișnuiește să se aprecieze (numai în lipsă de măsurători, înainte de deschiderea zăcămintului) această presiune cu relația (1) în care, evident, partea întâia este presiunea uniformă, iar γ este luat corespunzător apei dulci (1000 kg/m^3) sau celei saturate cu NaCl ($\sim 1180 \text{ kg/m}^3$). În realitate, afară de cazul zăcămintelor parțial deschise, natural sau prin exploatare, γ echivalent este mai mare, atingînd $1,2 - 1,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Explicația propusă se bazează pe de o parte pe influența presiunii litostatice, în rocele cu plasticitate pronunțată, și pe de altă parte pe influența presiunilor orizontale (orogeneză sau diapirism). În ambele cazuri existența fenomenului este condiționată de o perfectă închidere a zăcămintului, ceea ce, în general, se întîlnește mult mai frecvent la acumulările mici. Din această cauză, întîlnirea în foraj a unor formațiuni necunoscute, care provoacă manifestări de presiuni simțitor superioare celor așteptate,

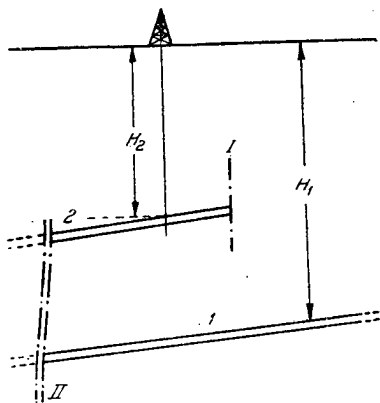


Fig. 1. Reprezentarea schematică a formării presiunilor de zăcămint care depășesc mult presiunea hidrostatică corespunzătoare adîncimii. 1 — strat adînc, gazeifer, cu adîncimea H_1 ; 2 — strat superficial gazeifer sau petrolifer, cu adîncimea H_2 ; I — limitare tectonică sau litologică a stratului 1; II — comunicație între stratele 1 și 2.

constituie un indiciu de existența acumulărilor de hidrocarburi, pozitiv din punct de vedere calitativ, dar, în oarecare măsură, chiar negativ, din punct de vedere cantitativ *). În zăcămintele cu hidrocarburi cu greutate specifică mică se pot întîlni presiuni neașteptat de mari, în comparație cu cea hidrostatică. Ele se explică, în general, prin schema dată în fig. 1.

*) Este evident că ultima concluzie este o simplă probabilitate.

Stratul 2 este situat la adîncime mică H_2 (de exemplu, $H_2 = 600 \text{ m}$) și fără altă deschidere decît comunicația II cu stratul 1 situat la adîncimea H_1 , mai mare (de exemplu $H_1 = 1100 \text{ m}$), aflat sub regim de presiune hidrostatică (de exemplu, $P = 1,18 \cdot 110 = 129,8 \text{ at}$) și este alimentat cu presiune de acesta. Dacă stratul 1 este gazeifer, greutatea coloanei de fluid dintre cele două strate, prin comunicația eventuală II, este foarte mică (de exemplu $1100 - 600 \cdot 10^{-1} \cdot 0,72 \cdot 10^{-3} \cdot 127 = \approx 4,6 \text{ at}$), astfel încît P_2 este foarte mare (circa $125,2 \text{ at}$), în comparație cu presiunea hidrostatică corespunzătoare lui. În exemplul dat, presiunea stratului 2 corespunde aparent unei presiuni hidrostatice a unui fluid cu densitatea peste 2 ($125,2/60 = 2,09$) ceea ce, evident, face forajul stratului 2 foarte dificil și chiar riscat, în cazul cînd situația nu este prevăzută.

b. Distribuția presiunii într-un zăcămint

Distribuția presiunii într-un zăcămint în echilibru, înainte de deschidere, variază cu adîncimea elementului de zăcămint, corespunzător greutății specifice a fluidului saturant (în faza continuă) respectiv (v. și Cap. V F.j). Pentru urmărirea distribuției în spațiu și în timp, în zăcămint, după punerea în exploatare, se studiază și se reprezintă această repartitie prin curbe izobare, în proiecție orizontală, curbele-loc geometric de egală presiune.

Pentru eliminarea influenței diferenței de adîncime dintre diferitele puncte ale zăcămintului, presiunea reprezentată, pe hărțile de izobare nu este, de obicei, cea absolută, ci cea «redusă» la un anumit plan orizontal de referință (mai comod: planul ipotetic al suprafeței de separație apă-țitei):

$$P_r = P_a + z\gamma, \quad (3)$$

unde:

- P_r — este presiunea redusă a punctului, A, oarecare, al stratului, în kg/m^2 ;
- P_a — presiunea absolută a punctului, A, oarecare, al stratului, kg/m^2 ;
- z — diferența de altitudine dintre punctul A și planul de referință, pozitiv de jos în sus, în m;
- γ — greutatea specifică medie a fluidului care saturează stratul în regiunea dintre punctul A și planul de referință, în kg/m^3 .

Este necesar să se dea o deosebită atenție interpretării și comparării datelor de presiuni reduse în porțiunile de zăcămint saturate cu fluide diferite.

c. Presiunea de zăcămint

Presiunea de zăcămint (statică) este definită, de obicei, ca presiunea redusă la conturul de alimentare (v. Cap. II.A.e). Practic, ea se

determină fie prin măsurători directe, intermediare, în sonde de exploatare, ținute în inactivitate un timp suficient pentru echilibrarea presiunii de la fundul sondei cu cea de zăcămint (ceea ce, practic, este foarte rar posibil, din motive economice) sau numai un timp mai scurt, suficient pentru trasarea unui arc al curbei de restabilire a presiunii în funcție de timp și pentru extrapolarea (grafică sau mai ales analitică) acesteia până la valoarea asimptotică a presiunii *), fie prin măsurători continue în sonde situate în apropierea conturului zonei petrolifere (sonde piezometrice). Se iau în considerație următoarele feluri de presiuni: *presiunea statică de zăcămint*, definită ca mai înainte, măsurată după oprirea tuturor sondelor productive sau a sondelor de injecție din zăcămint; *presiunea dinamică de zăcămint*, care nu mai este o mărime caracteristică întregului zăcămint, ci unui element al său (fundul unei sonde oprite, singur, până la stabilirea presiunii), ceea ce coincide cu *presiunea statică a sondei*, și *presiunea dinamică a sondei*, presiunea efectivă cu care lucrează stratul în punctul atins de sondă.

d. Măsurarea directă a presiunilor

Măsurarea directă a presiunilor se efectuează cu manometre de fund. Se cunosc manometre de fund de construcții foarte variate: manometre de maxim, manometre teleindicatoare, manometre cu măsură intermitentă la intervale predeterminate, manometre cu înregistrare continuă etc. Din punctul de vedere al construcției elementului de măsură, se cunosc manometre cu tub Bourdon obișnuit, cu tub spiral, cu piston și cu resort, cu fluid compresibil, etc.

Manometrele cu indicație discontinuă, unică sau intermitentă, nu se mai folosesc astăzi.

Manometrele cu indicație continuă și cu transmisie prin teleindicație prezintă dezavantajul unei construcții complicate și al unei deserviri și întrețineri delicate, cum și al unei precizii relativ limitate. Ele se folosesc astăzi numai în cazuri speciale: montate aproape permanent (de obicei ~ 12 zile) la sondele în pompaj pentru studiul regimului tehnologic optim. Ele folosesc, de obicei, transmisia prin oscilații electromagnetice de înaltă frecvență și, din cauza limitării capacității sursei de energie (baterie), lucrează intervale de timp de câteva secunde până la câteva minute, la intervale de timp destul de scurte, pentru ca ansamblul determinărilor să se prezinte ca o curbă continuă. Ele sînt fie de tipul cu cuarț piezoelectric, fie de tipul cu membrană elastică semirigidă, a cărei deformare modifică capacitatea unui condensator intercalat într-un circuit oscilant al unei heterodine. Modifi-

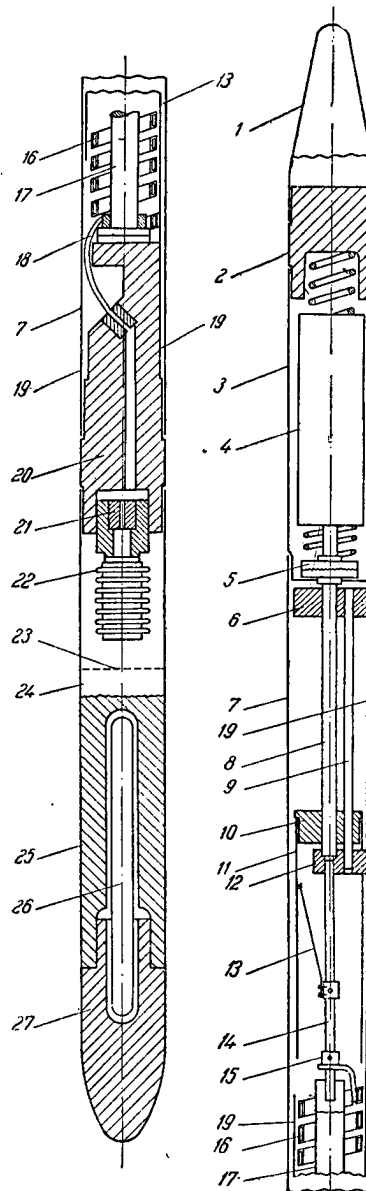


Fig. 2. Reprezentarea schematică a manometrului KIP (KIP) — MFT1:

1 — dispozitiv de prindere la cablu; 2 — reducere; 3 — carcasa motorului; 4 — motor (ceasornic); 5 — cuplaj cu talere dințate; 6, 10, 12 — piese de conducere; 7 — carcasa părții înregistratoare; 8 — axa inscripțurului; 9 — tija de conducere; 11 — diagrama; 13 — stil inscripțor; 14 — tija de ghidaj pentru inscripțor; 15 — mutelca de fixare; 16 — element Bourdon spiral; 17 — ghidaj pentru 16; 18 — tub de transmitere a presiunii; 19 — carcasa părții manometrice; 20 — reducere de legătură; 21 — duza de amortizare; 22 — burduf metalic; 23 — sita; 24 — fluid din sondă; 25 — corpul termometric; 26 — termometru maximal; 27 — piesa-sabot.

*) V. lucrarea prof. I. A. Ciarnii. Neft. Hoz. 3/1955 pag. 40—48 lucrarea lui S. N. Nazarov, Neft. Hoz. 1/1955 pag. 46—52.

carea frecvenței de oscilație a acestora, după recepția și după amplificarea la zi, este determinată prin comparație cu o heterodină acordată pe frecvența inițială a celei de la fund.

Ansamblul este prevăzut cu o curbă de etalonare dînd presiunea în funcție de variația frecvenței, ținîndu-se seama de efectul temperaturii.

Manometrele cu înregistrare continuă sînt cele mai răspîndite. În cele ce urmează se descriu numai cîteva dintre cele mai răspîndite în R.P.R., și U.R.S.S.

Manometrul KIP (КИП—МГГ1) este un manometru robust, care satisface nevoile de exploatare curentă (v. fig. 2.)

Manometrul ing. M. M. Ivanov (Institutul de Petrol Ufa) este în același timp și un manometru înregistrator și un termometru înregistrator. Elementul de măsurare a presiunii este un vas prismatic de oțel 1 (fig. 3), cu pereți relativ subțiri, a căror deformare elastică, sub influența presiunii exterioare, micșorează volumul interior al vasului.

Micșorarea acestui volum are drept consecință refularea unei părți din mercurul cu care este umplut, în camera 12, a cărei secțiune, mai mică decît a vasului 1, amplifică deplasarea meniscului.

Pe meniscul mercurului plutește, parțial scufundat, un plutitor de ebonită (densitate intermediară H_{1,4}, între 0,85—13,6), care prin pistonul 4 și prin tija 9 înscrisă, cu un stil de oțel, o curbă de presiune pe foaia de aluminiu care căptușește tamburul 8. Ordonata acestei curbe, elongația stilului, respectiv a plutitorului, este proporțională cu presiunea (în realitate, nu strict proporțională, ci crescînd conform curbei de etalonare), iar abscisa curbei este dată de rotirea tamburului 8 prin acțiunea resortului 7 și a mecanismului de ceasornicărie aflat deasupra lui. Pe aceeași diagramă, însă la un nivel sensibil inferior, pentru a nu atinge curba de presiune, un alt stil înscrisă curba de temperatură.

Poziția acestuia este comandată în mod analog de poziția plutitorului 10 din camera 3. Acesta plutește pe un menisc mercur-ulei, a cărui poziție este determinată de volumul de mercur evacuat ca prea plin din tubul 2. Tubul 2, avînd pereții groși, este practic rigid, astfel încît nivelul din camera 3 este influențat numai de dilatarea termică a mercurului din tubul 2.

Aparatul măsoară cu o precizie remarcabilă și prezintă avantajul ridicării simultane a diagramelor de presiune și de temperatură. Ridicarea diagramei continue de temperatură permite corectarea în condiții excelente a efectului de temperatură asupra mercurului din elementul de presiune, efect care nu poate fi eliminat. Gabaritul exterior al aparatului este suficient de redus, 45 mm, iar durata de înregistrare poate atinge 36 ore.

Manometrul înregistrator al Laboratorului central Cîmpina, folosit pe scară largă în R.P.R., este un aparat de o precizie remarcabilă. Eroarea de histerezis, prezentă la toate aparatele cu piston și cu resort, datorită frecării tijei pistonului la trecerea din camera cu presiune de

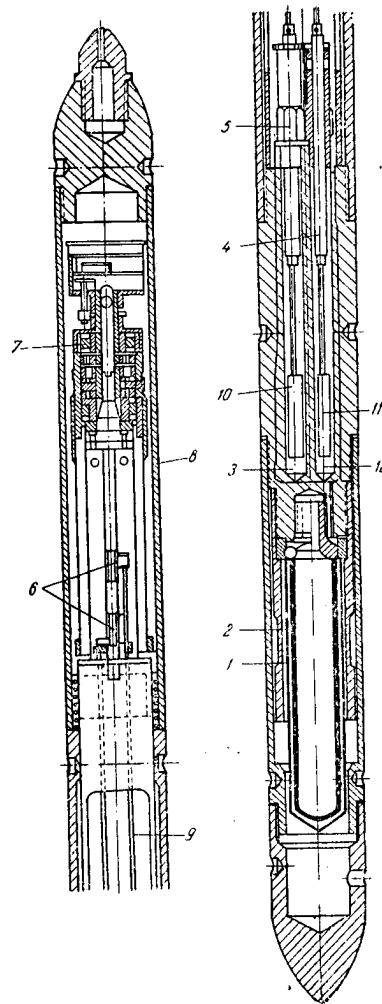
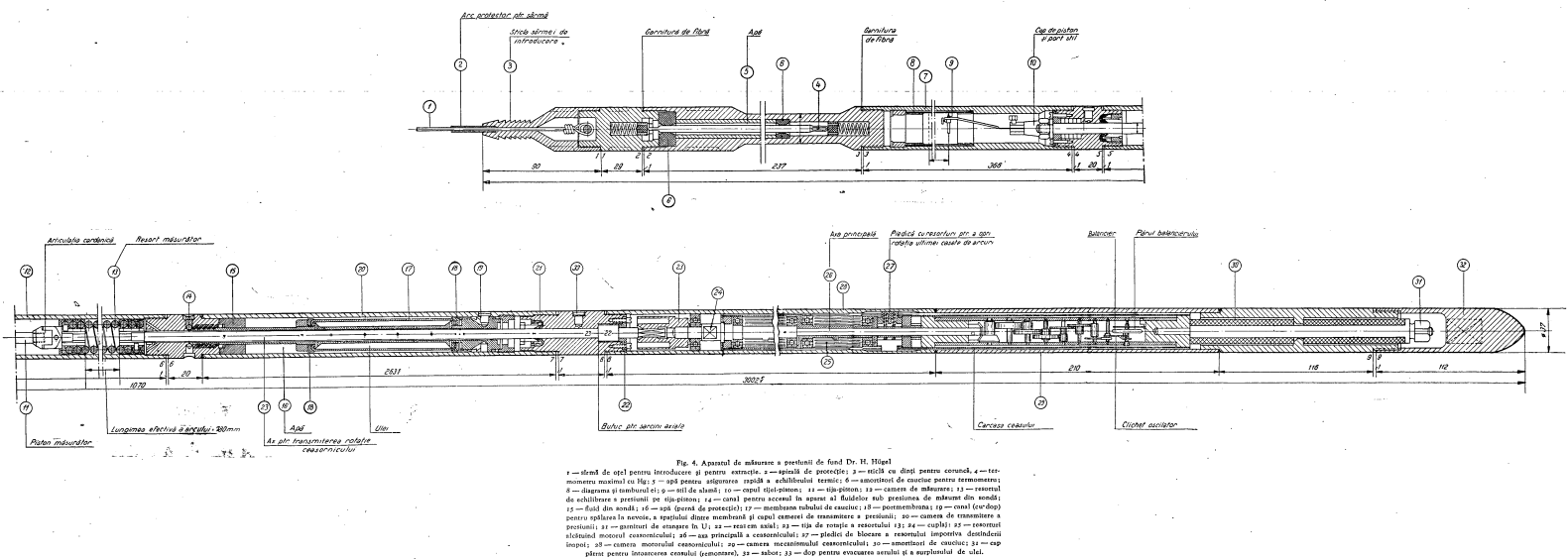


Fig. 3. Representarea schematică printr-un manotermograf M.M. Ivanov, Ufa N.I.I. (УФНИИ):

1 — tub piezometric cu Hg; 2 — tub termometric cu Hg; 3 — cameră de preaplin a tubului piezometric 1; 4 — piston de măsurare a presiunii; 5 — cilindru de ghidaj pentru pistonul 4; 6 — stiluri înregistratoare de presiune, respectiv de temperatură; 7 — resort-motor; 8 — tamburul diagramei; 9 — tijă de transmisie a poziției meniscului Hg-ului; 10 — plutitor termometric; 11 — plutitor piezometric; 12 — camera de preaplin a tubului termometric 2.

măsurat în camera cu presiune atmosferică, de înregistrare, este practic suprimată la acest aparat, prin menținerea tijei pistonului de măsurare în stare permanentă de rotație față



de garnitura de etanșare. Deși mișcarea respectivă de rotație este relativ lentă, pistonul atinge (pentru o anumită presiune) în 2—3 minute aceeași poziție, indiferent dacă poziția ocupată anterior corespunde unei presiuni mai mari sau mai mici decât cea măsurată.

Aparatul are: o cameră-motor, compusă dintr-un mecanism de ceasornicărie și dintr-o serie de resorturi cuplate în serie (de obicei 6), identică cu cea folosită la declanșarea cu întârziere a dispozitivului de închidere al aparatului de recoltat probe de fund (v. Cap. IV B.d.2.c, fig. 170), o cameră de transmitere a presiunii fluidului din sondă la uleiul de măsurare (pentru evitarea pătrunderii țiteiului cu impurități în dispozitivul de măsurare), o cameră de măsurare și o cameră de înregistrare. El este completat cu o cameră pentru termometrul de control (maximal).

Fluidul din sondă, a cărui presiune trebuie măsurată pătrunde în camera de transmitere 20 (fig. 4) prin canalul 14. El transmite presiunea lui apei din camera 20, destinată a evita contactul țiteiului cu membrana de cauciuc, 17 iar aceasta, membranei tubulare de cauciuc 17, respectiv uleiului de ricin din interiorul acesteia. Uleiul, comunicând cu cel din camera 12 de măsurare, exercită asupra acestuia aceeași presiune (cu aproximația constantă a greutatei coloanei de ulei dintre canalul 14 și suprafața pistonului de măsurare 11). În această cameră, presiunea se exercită cu efect util (de măsurare) asupra secțiunii țitei-piston 11, care este împinsă înafara camerei până când elongația resortului care o reține, echilibrează apăsarea uleiului asupra secțiunii țitei. După calitatea resortului-măsurător 13, deformația acestuia, deplasarea țitei 11 și a stilului inscripător 9 sînt mai mult sau mai puțin proporționale cu presiunea din sondă.

În practică se ridică totdeauna o curbă de etalonare $P = f(y, t^\circ)$, unde y este ordonata înscrisă de stil, în cm și t° temperatura.

Forma cea mai obișnuită a funcției de calibrare este:

$$P = ay + b, \quad (4)$$

unde:

P este presiunea absolută, în kg/cm^2 ;

a — o funcție de temperatură, caracteristică resortului, independentă de presiune, în kg/cm^3 ;

b — o funcție de temperatură, independentă de presiune, în kg/cm^2 .

Parametrii a și b se determină experimental exercitînd asupra aparatului introdus în baia de apă, după atingerea echilibrului de temperatură, o presiune controlată cît mai exact cu un manometru cu greutate sau cu o balanță de presiune; a și b fiind practic funcții liniare de temperatură, ele se pot determina prin două măsurători (de preferință 3) și prin interpolare. Ca la toate manometrele cu deformație

elastică, calitățile elastice și dimensionarea resortului, astfel încît să lucreze cu rezistențe la forfecare cît mai reduse, sînt determinante. Se recomandă oțelurile cu V sau bronzurile cu Be. În serviciu, din cauza micilor deformații permanente care totuși se produc, parametrul b trebuie verificat cît mai frecvent. Verificarea cea mai obișnuită constă în măsurarea presiunii atmosferice la începutul și la sfîrșitul probei (linia «de zero» a aparatului). Pentru realizarea unei sensibilități cît mai mari în fiecare gamă de presiuni se folosesc resorturi a căror alungire de 220 mm se produce în gamele 0—26, 0—62, 0—124, 0—186, 0—333 și 0—485 kg/cm^2 . Eroarea absolută făcută la măsurarea cu acest aparat este inferioară valorilor de 1 kg/cm^2 în gama 0—485 kg/cm^2 , respectiv 0,1 kg/cm^2 în gama 0—62 kg/cm^2 (0,2% respectiv 0,16%). O cauză de erori care se poate ușor evita la acest aparat o constituie umplerea cu o cantitate exagerată de ulei de ricin, astfel încît, prin dilatarea termică a acestuia, membrana 17 se lipește de pereții camerei 20, iar presiunea efectivă în ulei devine mai mare decât presiunea din sondă. Ea poate fi evitată prin conectarea racordului de calibrare 14 la o pompă de ulei și prin exercitarea în camera 20 a unei presiuni puțin mai mare decît limita superioară a gamei de lucru a resortului. În această situație, stilul ajunge la extremitatea cursei lui și, prin slăbirea dopului 33, se scurge o parte din ulei, pînă cînd stilul regresează cu circa 10 mm, interval suficient pentru compensarea dilatației termice a uleiului și pentru evitarea lipirii membranei 17 de pereții camerei 20.

Mecanismul de ceasornicărie introdus în 29 poate lucra cu diferite viteze. Corespunzător acestora, tamburul cu diagrama 8 poate executa 24 rotații în 12 ore (o rotație în 30 minute), 24 rotații în 72 ore (o rotație în 3 ore) sau 24 rotații în 12 zile (două în 24 ore). Viteza mare este folosită în mod curent din motive economice, celelalte fiind folosite practic numai în sonde piezometrice sau (viteza minimă) în sonde în pompă, aparatul nefiind introdus însă în acest caz cu sîrmă, ci sub sorbul pompei.

Deoarece aparatul redă curba presiunilor ca funcție de timp, iar interpretarea rezultatelor necesită cunoașterea ei ca funcție de adîncime, este necesar ca aparatul să fie folosit împreună cu un dispozitiv care să dea adîncimea de introducere în funcție de timp. Aceasta se realizează prin introducerea aparatului cu viteză constantă, cu ajutorul unei frîne comandate de un regulator de viteză centrifug (v. fig. 13), de tipul cu lame elastice. Pentru a evita totuși importante erori de adîncime, inerente însumării continue a erorilor provenite din imprecizia reglării vitezei, aparatul este oprit la adîncimi cunoscute (de obicei, hectometri întregi) un timp suficient pentru ca stilul 9 să înscrie pe curbă un palier de presiune

constantă, care permite verificarea adîncimii și corelarea ei cu presiunea.

Extracția aparatului se face, în general, cu viteză mult mai mare, iar numărul de stațiuni-palier este redus (în general, la circa 500 m o stațiune) (v. fig. 5, care reprezintă o diagramă luată la o sondă în erupție, cu sonda în mers).

Datorită artificiu-lui stațiunilor-palier, la se renunță deseori reglarea automată a vitezei cu ajutorul dispozitivului reprezentat în fig. 13.

După ce valorile presiunii în dreptul fiecărui palier de staționare au fost citite atent, cu lupa, ele se corectează după ecuația de etalonare a aparatului (4) pentru temperatura respectivă. (Deoarece aparatul are un termometru maximal, se admite o repartitie liniară a temperaturii între cea maximă, la adîncimea maximă atinsă de aparat, și cea determinată la zi, la capul de erupție). Valorile corectate ale presiunii se înscriu sub formă de tabelă și de diagramă, în funcție de adîncime, ceea ce, în cazul sondelor oprite, permite identificarea imediată a poziției nivelului gaze-țiței (eventual și a celui apă-țiței, dacă există), iar la cele în erupție permite studiul variației presiunii cu adîncimea, a gradientului de presiune cu adîncimea și analiza lucrului coloanei de țevi de extracție (v. fig. 6 și 7 și Cap. IX).

Fig. 5. Diagrama de presiune în funcție de timp (și de adîncime) ridicată cu aparatul din fig. 4, sondă în erupție cu sonda în mers.

lului gaze-țiței (eventual și a celui apă-țiței, dacă există), iar la cele în erupție permite studiul variației presiunii cu adîncimea, a gradientului de presiune cu adîncimea și analiza lucrului coloanei de țevi de extracție (v. fig. 6 și 7 și Cap. IX).

e. Restabilirea presiunii într-o sondă oprită din exploatare

Restabilirea presiunii într-o sondă oprită din exploatare este studiată în scopul de a cunoaște presiunea de zăcămint și de a determina parametrii regimului optim de lucru al sondei (v. Cercetarea sondelor).

În cazul unei curgeri monofazice în strat (gazele integral în soluție), ecuația restabilirii nivelului, respectiv a presiunii în strat are forma:

$$P_s - P = (P_s - P_0) e^{-at_i}, \quad (5)$$

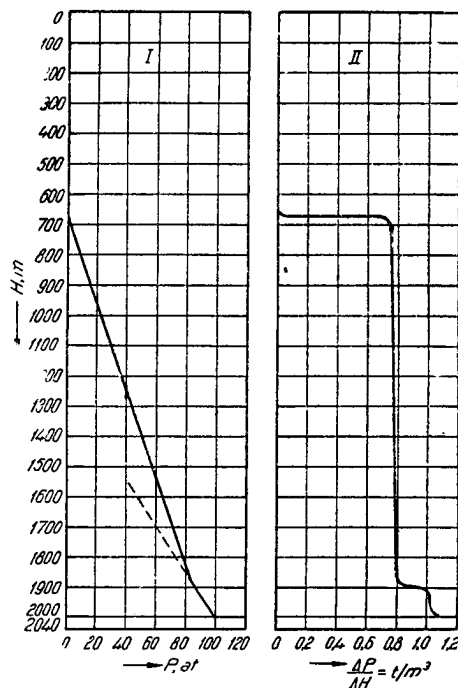


Fig. 6. Diagrama presiune-adîncime, la o sondă oprită; caz particular, sonda produce și mici cantități de apă, care se acumulează sub nivelul perforatorilor: I — curba presiune-adîncime; II — curba gradient de presiune-adîncime.

în care:

- P_s — este presiunea stabilizată a sondei oprite, în ata;
- P_i — presiunea sondei oprite, la timpul $t = t_i$, în min;
- P_0 — presiunea sondei oprite, la timpul $t = 0$, în min;
- a — un coeficient determinat de caracteristicile geometrice și de curgere ale sondei, în $(min)^{-1}$.

$$a = \frac{K}{14400 \cdot F}, \quad (6)$$

unde:

- K este coeficientul de productivitate al sondei, exprimat în tone/zi·at;
- F — secțiunea liberă a coloanei în care se restabilește presiunea, în m^2 .

Prin aplicarea ecuației în mai multe puncte (P_i, t) determinate experimental, se poate găsi un sistem de ecuații care să dea, prin eliminare, pe P_s . În principiu, sînt suficiente trei puncte de coordonate, P_{i-1}, P_i și P_{i+1} , pentru eliminarea parametrilor a și t , cu ajutorul unui artificiu care constă în a determina cele trei presiuni, la intervale de timp egale. Cu

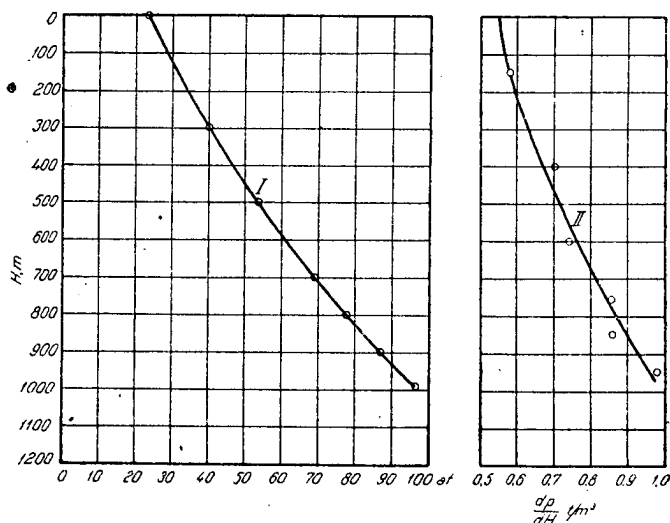


Fig. 7. Diagrama presiune-adâncime, la o sondă în erupție:
I — curba presiune-adâncime; II — curba gradient de presiune-adâncime.

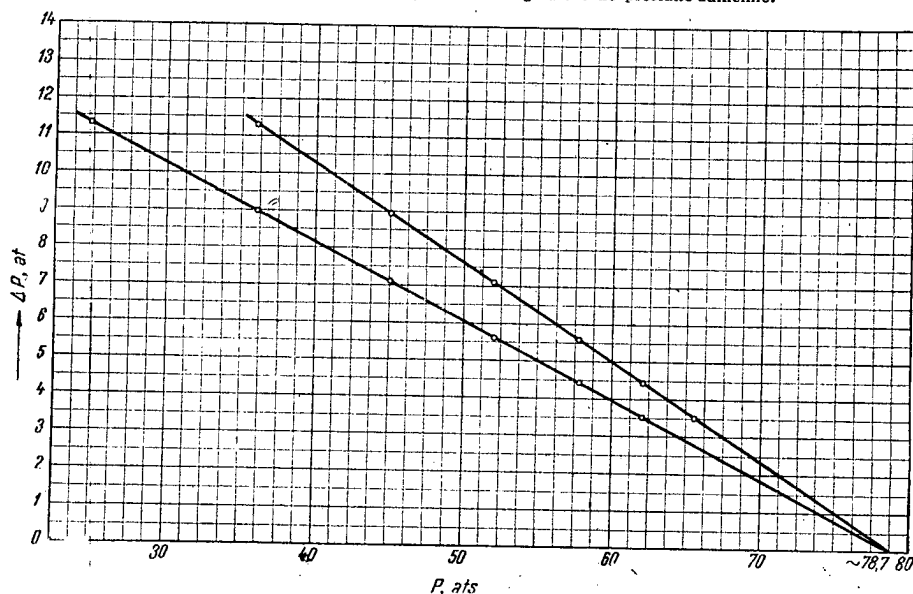


Fig. 8. Determinarea grafică a presiunii stabilizate a unei sonde oprite:

Date de plecare:

Ora observației	Presiunea transitorie
5 h 45'	24,8 at
9 h 08'	36,1 at
12 h 33'	45,0 at
15 h 58'	52,1 at
19 h 25'	57,7 at
21 h 48'	62,1 at
24 h 13'	65,6 at

Presiunea stabilizată rezultată prin calcul grafic $P = 78,5$ at. Presiune stabilizată rezultată prin calculul analitic, cu ecuația (7) $P_s = 78,7$ at.

această condiție, ecuația (5), aplicată în momentele t_{i-1} , t_i și t_{i+1} , dă prin eliminare:

$$P_s = \frac{P_i^2 - P_{i-1} \cdot P_{i+1}}{2 P_i - (P_{i-1} + P_{i+1})} \quad (7)$$

Ecuația (7) este cea mai adecvată dintre numeroasele metode propuse pentru determinarea presiunii stabilizate, însă utilizarea ei practică este condiționată de: 1) cunoașterea cit mai exactă a presiunilor nestabilizate P_i și 2) efectuarea calculelor cu precizie superioară preciziei cunoașterii presiunilor.

Trebuie observat, îndeosebi, că dacă, dintr-o eventuală grăbă și din dorința de a nu pierde din producție, se reduce intervalul de măsurare $t_{i+1} - t_{i-1}$ la valori prea mici, numitorul părții a doua a ecuației (7) scade foarte repede, devenind îndată de același ordin de mărime cu eroarea de măsurare a presiunilor, ceea ce face iluzorie precizia rezultatelor obținute cu ecuația (7).

Ecuația (7) își păstrează, însă, toată valoarea practică în cazul cînd presiunile P_i sînt măsurate cu un aparat care prezintă o eroare sistematică, constantă ca valoare și ca semn și, bineînțeles în limitele erorilor uzuale.

Pentru rezolvarea aceleiași probleme se poate folosi și o metodă grafică, care constă în reprezentarea diferenței dintre două presiuni consecutive nestabilizate, în funcție de presiunea finală a intervalului de timp respectiv, și în extrapolarea curbei obținute, care, în conformitate cu ecuația (5), este o dreaptă. În acest caz este preferabil ca aceste intervale să fie (la egală durată totală) cit mai mici, pentru a se dispune de un număr mai mare de puncte. Metoda este, în principiu, identică cu cea folosită la cercetarea sondelor în privința caracteristicilor de aflus cu deosebirea că în cazul cercetării sondelor, presiunile P_i se exprimă, de obicei, prin înălțimi de coloană de lichid. Deoarece prin definiție, cînd P_i tinde către P_s , $P_{i+1} - P_i$ tinde către zero, iar valoarea lui P_s se obține prin prelungirea dreptei de variație a presiunii pînă la intersecția ei cu axa presiunilor ($P_{i+1} - P_i = 0$) (v. fig. 8).

Problema este în orice caz complicată în cazul sondelor cu indice de productivitate mic. (permeabilități mici sau strate foarte subțiri cu permeabilitate mijlocie). Se poate considera practic că durata de măsurare a evoluției presiunilor nestabilizate trebuie să fie de cel puțin 30% din durata teoretic necesară pentru atingerea unei presiuni tranzitorii egală cu 90% din presiunea stabilizată *). Este evident

*) Se preferă, uneori, să se exprime o condiție aproximativ echivalentă sub forma: diferența dintre presiunea stabilizată și cea tranzitorie să fie redusă în cursul măsurătorii cel puțin în proporție de 4 la 1.

că această limită depinde foarte mult și de precizia de lucru a aparatelor de măsurat **).

f. Măsurarea presiunii de zăcămint cu ajutorul sondelor piezometrice

Această măsurare a presiunii de zăcămint se efectuează, de obicei, în mod continuu. Pentru a realiza această continuitate și a nu imobiliza un aparat de măsurat, presiunea de zăcămint se măsoară cu un manometru înregistrator la gura sondei piezometrice, în cazul cînd aceasta

are o presiune de fund superioară celei hidrostatice, sau cu ajutorul unui indicator de nivel, înregistrator, de tipul cu plutitor, ca cel reprezentat în fig. 9, dacă presiunea de fund este inferioară celei hidrostatice.

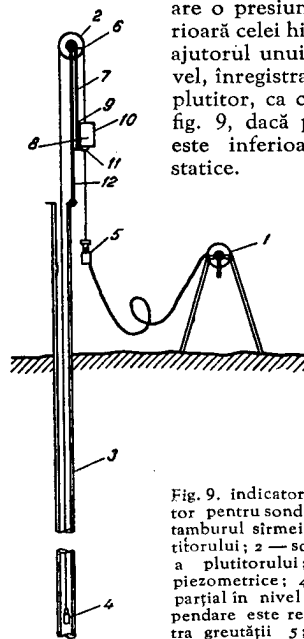


Fig. 9. indicator de nivel înregistrator pentru sonde piezometrice: 1 — tamburul sîrmei de suspensie a plutitorului; 2 — scripetele de suspensie a plutitorului; 3 — coloana sondei piezometrice; 4 — plutitor cufundat parțial în nivel (coeficientul de suspendare este reglat cu ajutorul contra greutății 5; 5 — contra greutate de echilibrare a greutății necompensate prin plutire a plutitorului și a sîrmei de suspendare; 6 — scripete cu diametru mic (de exemplu 1/10 din diametrul scripetelui 2); 7 — fir de înregistrare, la cursă redusă a poziției; 8 — penița de înregistrare; 9 — ghidajul peniței; 10 — tamburul cu diagrame (o rotație la 24 ore în jurul axului vertical); 11 — platforma cu motor de ceasornic; 12 — dispozitiv de fixare rigidă la gura sondei.

Indicatoarele de nivel ale sondelor piezometrice pot fi amenajate astfel încît să permită studiul variațiilor de presiune în sondă cu erori mai mici decît 10^{-3} at ceea ce este deosebit de util pentru determinarea unora dintre parametrii necesari stabilirii ecuațiilor de bilanț material, cum și pentru studiul influenței reciproce a sondelor, grupurilor de sonde sau chiar a compartimentelor tectonice parțial comunicante ale zăcămintului.

În cazul cînd presiunea de fund a sondei piezometrice depășește presiunea dată de greutatea coloanei de fluid din sondă, măsurarea:

**) Pentru cazul regimului elastic, respectiv a curgerii heterogene v.
— I. A. Ciarnii Neft. Hoz. 3/1955 pag. 40—48.
— S. N. Nazarov „ „ 1/1955 „ 46—52

cu manometrul, de obicei mult mai puțin precisă, este în acest caz particular, suficient de precisă dacă sonda este plină cu apă, deoarece manometrul nu mai măsoară întreaga presiune de fund, ci numai diferența dintre aceasta și greutatea coloanei de apă, iar eroarea absolută de măsurare a manometrului raportată la întreaga presiune de fund reprezintă o eroare relativă mult mai mică. În cazul particular când sonda piezometrică este o sondă care deschide zona de gaze libere, măsurarea este mult mai puțin precisă, deoarece: 1) eroarea absolută de măsurare a manometrului, repartizată la întreaga presiune măsurată poate atinge valori de ordinul 0,5—1,0%; 2) coloana de fluid din sondă poate să nu fie alcătuită integral din gaze, ci, în parte, și din lichide (apă din strat sau hidrocarburi condensate), ceea ce reduce aparent presiunea măsurată (împotriva acestui factor nu se poate acționa decât prin păstrarea în sondă a unei coloane de țevi de extracție și prin curățirea periodică prin descărcare); 3) greutatea coloanei de gaze din sondă nu poate fi determinată exact. Dacă se consideră fluidul din coloană ca gaz perfect ($z = 1$) și se ține seama de variația temperaturii de-a lungul sondei, considerând-o liniară și afectând greutatea specifică la starea standard a gazelor din sondă, cu un coeficient de corecție egal cu raportul dintre 273°K și temperatura medie aritmetică absolută din sondă, presiunea de fund poate fi dedusă din presiunea de la gura sondei cu relația barometrică

$$P_f = P_g e^{\frac{\theta \gamma_0 H}{z P_0}} \quad (8)$$

în care:

- P_f este presiunea de fund } în oricare, ace-
 P_g — presiunea la gură } leși, unități;
 e — 2,718;
 $\theta = \frac{273}{T_m}$, unde T_m este temperatura medie din sondă;
 γ_0 — greutatea specifică la starea standard a gazului din sondă, în kg/m³ N;
 H — lungimea coloanei de gaze din sondă, în m;
 P_0 — presiunea la care este determinat γ_0 , de obicei $P_0 = 10\,332$ kg/m².

Dacă se consideră fluidul din coloană ca gaz real ($z \neq 1$), relația (8) devine:

$$P_f = P_g e^{\frac{\theta \gamma_0 H}{z P_0}}, \quad (9)$$

unde z este coeficientul de abatere a gazului de la legea gazelor perfecte și anume valoarea medie corespunzătoare condițiilor de presiune și de temperatură de-a lungul coloanei.

Pentru metan, între 0 și 140 at, se poate admite o variație (scădere) aproximativ liniară a lui z între condițiile de suprafață și cele de

fund, chiar relativ defavorabile (temperatură scăzută), cu o eroare finală referitoare la P_f mai mică decât 0,1%. Pe măsura creșterii greutății moleculare a gazului considerat (și, corespunzător, a scăderii temperaturii medii reduse din coloană) și, mai ales pentru presiuni reduse mai mari decât ~2 (practic peste 100 at), valoarea medie aritmetică dintre valorile z corespunzătoare condițiilor medii de temperatură din coloană nu mai este satisfăcătoare și astfel pentru problemele speciale, devine necesară integrarea diferențialei ecuației (9), ținând seama de variația lui z , ceea ce se poate realiza practic prin creșteri finite în două trepte, alese convenabil cu ajutorul diagramei reprezentate în fig. 43, B.

Pentru aplicarea expeditivă a ecuației (8) se poate folosi dezvoltarea în serie a puterilor lui e , obținându-se:

$$P_f = P_g \left[1 + \frac{\theta \gamma_0 H}{z P_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{\theta \gamma_0 H}{z P_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (10)$$

din care, uneori, nu se păstrează decât primii doi termeni din paranteză, obținându-se pentru gazul sărac la temperaturile obișnuite, în sonde de mică adâncime, formula expeditivă, dar de primă aproximare:

$$P_f = P_g (1 + 0,00012 H \delta), \quad (11)$$

în care

H este adâncimea, în m;

δ — densitatea față de aer a gazului sărac respectiv, în condiții standard (efectul temperaturii compensând mai mult sau mai puțin efectul abaterii de la legea gazelor perfecte), ecuație acceptabilă sub 100 at și pentru gaze cu $\delta < 0,8$.

Folosind ecuația (10) cu termenii exprimați, se obține, practic, în cele mai multe cazuri, o eroare mai mică decât 0,2% *).

B. TEMPERATURA ÎN ZĂCĂMINTELE DE PETROL ȘI DE GAZE

a. Distribuția temperaturii într-un zăcămint

Pătura Sial a litosferci, până la adâncimea de circa 6200 m, direct investigată, prezintă o distribuție conformă unui cîmp al cărui gradient este practic vertical și are valori cuprinse între 0,10°C/m, în regiunile cu fenomene vulcanice, și 0,01°C/m, în regiunile cu roce cu mare conductibilitate (roce cu conținut sensibil de minereuri metalice sau semimetalice). Suprafețele termice echipotențiale sînt, într-o primă aproximare, sferoide, în mare măsură paralele cu suprafața geoidului. Ele sînt afectate de o primă alterație, care tinde să le aducă la paralelism cu suprafața solului, și de a o doua alterație, mai redusă, care tinde să le aducă la paralelism cu suprafețele de strati-ficație.

*) v. și Cap. V din Culegere de probleme din extracția țiteiului G. Manolescu E.T. 1953.

Prima alterație este limitată în apropierea suprafeței și se datorește condițiilor de limită din ecuația de propagare a lui Fourier, a cărei rezolvare practică este deosebit de dificilă, în condiții de limită atât de neregulate. A doua alterație, prezentă numai în formațiile sedimentare și în cele de metamorfism tectonic, se datorește anizotropiei acestor roce care au o conductibilitate, în general, mai pronunțată de-a lungul direcțiilor cuprinse în suprafețele de stratificație decât în direcțiile normale la aceste suprafețe. O a treia cauză de alterație, mai frecventă în cazul zăcămintelor de petrol din regiunile cu diapirism pronunțat, este conductibilitatea generală a rocilor, diferită de la una la alta, în special, conductibilitatea apreciabil mai mare a sării decât a rocilor învecinate *).

Conductibilitatea generală a rocilor întâlnește în sonde variații în limite largi: de la $\sim 0,10$ kcal/m $^{\circ}\text{C}$ pentru ligniți, la $\sim 0,2$ kcal/m $^{\circ}\text{C}$ pentru nisipuri uscate relativ poroase, la $0,5 - 0,7$ kcal/m $^{\circ}\text{C}$ pentru rocele eruptive, la $1,30$ kcal/m $^{\circ}\text{C}$ pentru gipsuri și pentru anhidrite și la $1,40$ kcal/m $^{\circ}\text{C}$ pentru sare. Pentru rocele poroase, ea variază sensibil cu natura fluidului saturant și puțin cu dimensiunile porilor, fiind mai mică la rocele cu granulometrie fină. Rocale saturate cu apă (conductibilitate $1,4$ kcal/m $^{\circ}\text{C}$) sînt mult mai conducătoare decât cele saturate cu țiței ($0,5 - 0,8$ kcal/m $^{\circ}\text{C}$), respectiv cu gaze, a căror conductibilitate proprie este foarte redusă ($\sim 0,03$ kcal/m $^{\circ}\text{C}$).

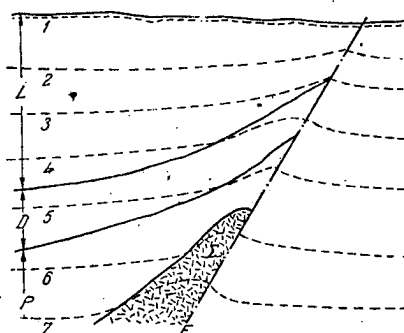


Fig. 10. Deformarea suprafețelor echipotențiale ale cîmpului termic, datorită diferențelor de conductibilitate termică a rocilor și morfologiei structurii:
L — Levantin; D — Dacian; P — Pontic; Σ — sare;
1...7 — suprafețe izoterme; F — falic.

Aceste variații determină o variație a gradientului termic (variația distanței dintre suprafețele echipotențiale) și deformarea lor (v. fig. 10).

Studiul cîmpului termic dă informații uneori utile exploatarei (completarea carotajului elec-

tric), în special, în cazul sondelor izolate și de adîncime relativ mare, dar utilitatea lor este restrînsă de necesitatea opririi circuitului de noroi un timp suficient pentru stabilirea echilibrului termic între gaura de sondă și teren, ceea ce poate prezenta serioase riscuri și limitează utilitatea ei.

Utilitatea ei curentă constă, de obicei, în localizarea punctelor de acces în sondă a fluidelor nedorite, cum și în efectuarea controlului cimentării. Detectarea punctelor de acces în sondă al gazelor, respectiv identificarea formațiilor devenite gazeifere, este bazată pe răcirea politropică a gazelor în detenta din zona imediat învecinată găurii de sondă. După debitul relativ de gaze (față de lichid) se constată răcirii de la cîteva fracțiuni de grad pînă la cîteva grade. În cazul unei rații mici de gaze, răcirea este redusă, deoarece 1) cantitatea de gaze care se răcește este mică și 2) efectul este mascat de schimbul de căldură dintre lichid și gazul răcit, a cărui capacitate calorică este mică față de aceea a lichidului.

Pe diagrama temperatură-adîncime, prezența formației producătoare de gaze se manifestă prin sporiri brusce ale pantei de cădere a temperaturii (v. fig. 11, între adîncimile 2210—2200 m, 2125—2115 și 2020—2015). Prezența formațiilor care debitează apă se manifestă prin încetinirea scăderii temperaturii, rareori chiar printr-o ușoară creștere (în orice caz, de ordinul zecimilor de grad), datorită modificării bilanțului termic al aflului. Pe cînd în formațiile care debitează țiței bilanțul este net deficitar fie din cauza detentei gazelor, fie din cauza căldurii latente de vaporizare, în cele care produc și apă, bilanțul este redresat de aportul de căldură al apei care acționează: 1) prin reducerea raportului dintre debitul de fluid care produce răcire și debitul de fluid care nu produce răcire și 2) prin efectul de volant termic al apei, a cărei căldură specifică este aproximativ dublă față de aceea a țițeiului.

Trebuie observat că, pe o diagramă temperatură-adîncime a unei sonde care debitează efectiv, temperaturile înregistrate prezintă (față de distribuția de echilibru a temperaturilor cu sonda oprită sau ipotetic inexistentă) un decalaj către adîncimi mai mici. Trebuie, de asemenea, observat că pe porțiunea inferioară a sondei, care nu debitează («buzunarul» sau «sacul»), distribuția temperaturilor este cea de echilibru (temperaturi mai mari, «efectul de talpă»). De îndată ce aparatul parcurge o zonă productivă de lichide, el indică o scădere mai lentă a temperaturii la reducerea adîncimii. Întîrzierea se datorește efectului de volant termic al lichidelor produse și are loc și în cazul țițeiului.

Utilizarea curbei temperatură-adîncime pentru detectarea nivelului pînă la care s-a ridicat nivelul cimentului în spatele coloanei (v. vol. I), se poate face numai în primele zile ale procesului de priză deoarece efectul exo-

*) Efectul poate fi excepțional în regiunile eruptive, caz neglijat din punctul de vedere al zăcămintelor de hidrocarburi.

termic al reacțiilor de priză scade relativ repede. La adâncimi mari, efectul este mai greu de observat, perioada de efect util este mai scurtă, îndeosebi dacă, pentru întârzierea prizei, apa a fost răcită în prealabil. În aceste cazuri, se recomandă introducerea de indicatori radioactivi în ciment.

Alte utilizări, mai rare, ale diagramelor temperatură-adâncime sînt: localizarea porțiunilor de coloană în dreptul cărora au loc circulații de apă de la un strat la altul, corelarea diagramelor de carotaj electric sau ridicarea de profile de conductibilitate termică a rocilor (ridicarea diagramei în a doua sau în a treia zi după cimentare, către sfîrșitul perioadei de efect termic maxim al prizei, cînd se stabilește un echilibru dinamic de temperatură cu mediul: temperaturi mai scăzute în dreptul rocilor mai conductoare, anhidrite, gipsuri, etc.).

Aplicațiile recente ale termocarotajului diferențial au arătat perspective extrem de promițătoare ale investigării anomaliilor strict locale ale cîmpului termic, v. V. N. Dahnov și V. A. Riapolova, Metoda diferențială de termometria sondelor. Geofizica industrială pag. 104—136. Gosoptehizdat Moscova 1954.

sau cu generarea acestuia chiar în strat) v. Cap. VI C.d. 4.

c. Măsurarea temperaturii de zăcămint

Măsurarea temperaturii de zăcămint nu se poate efectua decît în regiuni izolate, în puncte deschise prin sonde sau prin galerii. Ea se efectuează cu termometre maximele sau cu termometre înregistratoare.

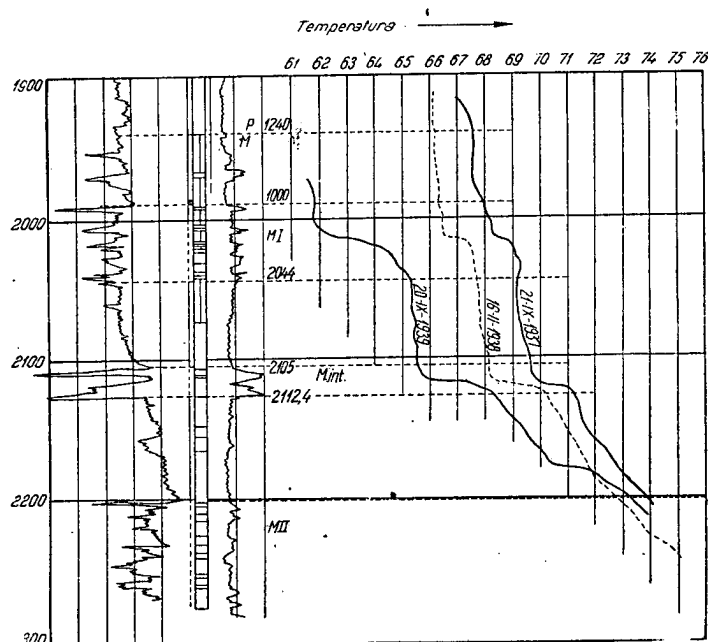


Fig. 11. Diagrama temperatură-adâncime, ridicată la o sondă erupтивă care exploata simultan cele trei orizonturi ale Meotianului: I — diagrama ridicată în sept. 1937; II — diagrama ridicată în feb. 1938; III — diagrama ridicată în sept. 1939. De observat că formațiile superioare, producînd cu rații mai mari de gaze, dau naștere la răcirii mai importante.

b. Variația (scăderea) temperaturii în zăcămint în cursul exploatării.

Variația (scăderea) temperaturii în zăcămint în cursul exploatării, deși relativ redusă, de la cîteva grade pînă la 10...15 °C, după adâncime și după intensitatea procesului de exploatare, nu este fără importanță practică, datorită variației viscozității fazei lichide pe care o provoacă. Pauzele de producție folosite în cazul aplicării metodelor de exploatare prin refacerea presiunii de zăcămint acționează favorabil și prin restabilirea echilibrului cu cîmpul geotermic, iar efectul util (sub ambele forme) este cu atît mai important, cu cît permeabilitatea rocii colectoare este mai redusă. Efectul termic este atît de important, încît a determinat tentative de exploatare secundară prin metode termice (cu aport extern de căldură

1. Măsura valorii absolute a temperaturii Termometrele maximele, fie de tipul clasic cu coloană de mercur împiedicată, fie de tipuri speciale, de exemplu camerele încărcate cu gaz sub presiune, obturate cu dopuri de aliaje fuzibile la diferite temperaturi, etc., au o utilitate limitată. Indicațiile lor pot servi numai pentru corecția altor mărimi determinate la sondă (presiune, rezistivitate electrică, etc.). Pentru studiul temperaturii în gaura de sondă, se folosesc numai termometre cu indicație sau cu înregistrarea continuă. Dintre aparatele cu indicație continuă face parte termometrul cu rezistență. O rezistență cu coeficientul de temperatură ridicat, etalonată prin determinări preliminare la zi, este cufundată în sondă, fiind conectată prin doi conductori izolați la o punte aflată la zi. Rezistența este măsurată prin comparație cu ajutorul punții, prin me-

toda de zero, iar variația rezistenței, respectiv a temperaturii, este înregistrată în mod con-

tinuu la zi, în funcție de adâncime. Dificultățile aplicării acestei metode constă în:

1) compensarea punții pentru variația termică de rezistență a conductorilor care leagă rezistența de măsurat din sondă la puntea de la zi și

2) în faptul că procesul de măsurare continuă și de înregistrare este automat. Din această cauză, metoda este aplicată practic cu ajutorul instalației și al operatorilor de la carotajul electric (v. vol. I).

Cele mai des folosite aparate înregistratoare de temperaturi sunt: în U.R.S.S., mano-termograful Ivanov (v. fig. 3); în R.P.R., termograful Laboratorului Central din Cimpina (v. fig. 12).

Termograful Laboratorului Central din Cimpina face parte din seria de aparate cu mecanismele de declanșare și de acționare identice. Partea lui înregistratoare este identică cu aceea a aparatului de măsurare a presiunii (v. fig. 4), diferența constând în înlocuirea elementului de măsurare a presiunii (17 din fig. 4) printr-un recipient rigid, umplut cu mercur, a cărui creștere de volum refulează în camera (12, fig. 4, v. și fig. 12) uleiul de ricin care, apăsând asupra tijei-piston (11, fig. 4), o deplasează împreună cu stilul 9, care înscrie pe diagrama 8 oordonată proporțională cu dilatația termică de volum a mercurului conținut în 12 (fig. 4). Rotirea stilului 9, proporțională cu timpul, datorită mecanismului de ceasornic, înscrie pe diagrama 8 o abscisă proporțională cu timpul, obținându-se o diagramă presiune-timp.

Resortul 13 nu mai are în acest caz rolul unui resort de echilibrare cu tensiune proporțională cu elongația, ci rolul unui resort de tensiune mai puțin variabilă, pentru readucerea stilului la ordonata inițială de îndată ce mercurul se contractă. O particularitate a aparatului constă în garnitura dublă de etanșare, între ale cărei elemente se găsește ulei sub presiune, furnizat de un alimentator cu piston și cu resort, 4, (fig. 12). Cerința deosebită de etanșeitate se datorește faptului că orice pierdere de mercur pe la punctul de trecere a tijelor 11 sau 23 (fig. 4) constituie o pierdere de volum de mercur, care provoacă o reducere eronată a temperaturii indicate, spre deosebire de cazul aparatului de măsurare a presiunii la care o pierdere din fluidul respectiv (ulei) nu are nici o influență asupra presiunii înscrise, atît timp cît pierderea rămîne sub o anumită limită (relativ mare) și cît timp membrana 17 (fig. 4) nu se sprijină direct pe reazemul ei.

Forma alungită a camerei cu mercur 12, suprafața ei mare și conductibilitatea mare a pereților și a conținutului ei permit atingerea echilibrului termic complet cu mediul înconjurător în câteva secunde, astfel încît se admite că coborîrea aparatului cu o viteză de 0,5–0,8 m/s asigură o înregistrare a temperaturii cu o

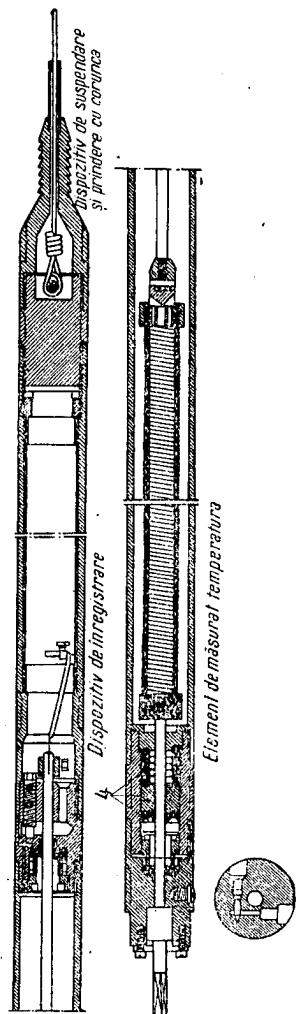


Fig. 12. Termograful Laboratorului central Cimpina (v. și fig. 4):

1 — sîrma de oțel pentru introducere și pentru extracție; 2 — spirală de protecție; 3 — sticlă cu dinți pentru coruncă; 4, 5, 6, 7 — camera de înregistrare; 8 — diagrama și tamburul ei; 9 — stil de alamă; 10 — capul tijei-piston; 11 — tija-piston; 12 — cameră de măsurare; 13 — resortul de readucere a stilului la poziția corespunzătoare temperaturii inițiale; 14 — garnitură dublă de etanșare, cu ulei sub presiune; 15 — resortul alimentatorului cu ulei sub presiune al garniturilor 14; 16 — pistonul alimentatorului cu ulei sub presiune al garniturilor 14; 17 — piuliță pentru reazemul resortului; 18 — piesele de la 18 la 21 se referă la manometru; 22 — reazem axial; 23 — tija de rotație a resortului 13; 24 — cuplaj; 25 — resortul alcătuiind motorul ceasornicului; 26 — axa principală a ceasornicului; (detaliile 27–32 sînt comune cu ale aparatului reprezentat în fig. 4 (v. detalii).

Observație. Piese 4–6 și 18–21 se referă numai la aparatul de măsurat presiunea.

eroare sensibil inferioară unei zecimi de grad. Scara de înregistrare a aparatului fiind de $4,5 \text{ mm}/^\circ\text{C}$, se poate citi ușor temperatura cu o eroare mai mică decât $0,1^\circ\text{C}$. Sensibilitatea aparatului poate fi sporită mult, la nevoie, prin folosirea unei tije-piston, 11 cu secțiune mai mică.

Deoarece aparatul nu dă direct diagrama temperatură-adâncime, ci diagrama temperatură-timp, pentru eliminarea parametrului timp, se realizează proporționalitatea $h = vt$, unde

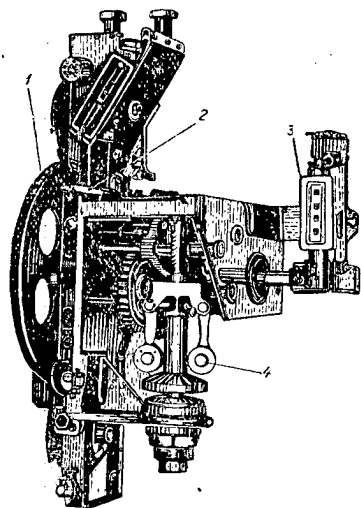


Fig. 13. Regulator de viteză pentru introducerea aparatului de măsurat presiunea:
1 — scripete pentru sîrma de susținere a aparatului;
2 — pîrghie de reglaj la diferite viteze; 3 — numărător de rotații (indicator de adâncime); 4 — regulator centrifug.

h este adâncimea de introducere, v — viteza de introducere și t — timpul. În acest scop se folosește regulatorul de viteză cu frînarea tamburului 1 (fig. 13) de către saboții acționați de forța centrifugă produsă de masele regulatorului 4 (fig. 13).

În principiu, se poate folosi în același scop metoda pauzelor de coborîre care dau paliere pe diagrama mărimii înregistrate, însă, în general, operația de măsurare a temperaturii este mai rapidă (se face pe distanțe mai scurte), iar precizia cerută măsurării adâncimii este puțin mai mare, astfel încît se preferă utilizarea regulatorului de viteză.

2. Termocarotajul diferențial Prin construcția și experimentarea unui utilaj special ^{*}, s-a creat posibilitatea măsurării continue a diferenței între temperatura fictivă corespunzătoare

cîmpului geotermic regional și temperatura efectivă (abaterea locală față de cîmpul regional), cu o sensibilitate de ordinul 10^{-2}°C .

Studiul diagramei de variația acestei abateri cu adîncimea permite abordarea cu mijloace noi a următoarelor probleme:

- Identificarea și separarea rocilor pe baza proprietăților lor termice (și întrucîtva prin cele mecanice — aptitudine de dărîmarea și lărgirea găurii de sondă);
- Identificarea orizonturilor gazeifere și petrolifere;

- Identificarea și separarea straturilor acvifere circulante, cu temperaturi diferite;

- Identificarea viiturilor de ape în sondă;

- Identificarea zonelor cimentate.

Determinările se pot face fie la echilibru termic, fie în regim termic nestăionar, eventual provocat prin circulația în gaura de sondă, a unui fluid cu temperatura simțitor definită de cea medie a sondei.

Interpretarea diagramelor astfel obținute cere un examen extrem de atent al condițiilor inițiale și locale ale găurii de sondă și, în general, nu își capătă toată valoarea decît prin coroborarea cu diferite alte mijloace de investigație, după natura problemei speciale atacate.

C. CÎMPUL DE RADIAȚII GAMMA ÎN ROCELE DE ZĂCĂMÎNT

Radioactivitatea rocilor din scoarță, în general slabă, dar măsurabilă totdeauna, este datorită radiațiilor α , β și γ emise de diferitele elemente radioactive ale lor. În ordinea importanței cantitative, ele sînt U, Th, izotopul cu greutatea atomică 40 al K, Ra și Rn (radonul sau emanația de radium). În ordinea importanței concentrațiilor lor în fluidele saturate și a intensității lor de radiație, Rn ocupă în general primul loc. Interesul identificării lor este deocamdată strict teoretic, deoarece elementele radioactive nu se găsesc niciodată izolate, din cauza reacțiilor în serie. În diferite condiții particulare (vîrstă și natura elementelor de origine), ele se găsesc în diferite concentrații de echilibru.

În roce, acumulările de elemente radioactive care interesează studiul zăcămintelor de petrol se întîlesc îndeosebi în unele sisturi argiloase batiale cu un anumit conținut în materie organică, colorate, în general, în brun, asocierea fiind suficient de frecventă pentru a permite emiterea unei teorii a formării țiteiului prin procese biochimice, influențate în faza finală (hidrogenare catalitică naturală) de procesele radioactive. Mineralul de U respectiv este, probabil, o formă coloidală a carnotitei. Prezența Th în apele zăcămintelor de petrol a fost pusă în evidență de Bobin, în zăcămintele de la Uhta, ca și a Rn.

În practică nu se studiază conținutul în substanțe radioactive (concentrații individuale sau globale), ci intensitatea de radiație.

^{*} v. Vol. I. Măsurători speciale (carotajul) — Termocarotaj diferențial și Geografia industrială de V. N. Dahnov și V. A. Riapolova — Gostoptehdizdat 1954, pag. 104—136.

Radiațiile α , particule materiale (He^{++}) cum și cele β (electroni, sarcini elementare negative) se propagă pe distanțe prea mici prin rocele scoarței și nu pot pătrunde cu intensitate detectabilă cimentul și coloanele de sondă. Radiațiile γ (oscilații electromagnetice cu lungimea de undă $\lambda = 3 \cdot 10^{-9} \dots 5 \cdot 10^{-11}$, frecvența $f = 1 \cdot 10^{19} \dots 3 \cdot 10^{20}$ pe secundă, cuplate cu fotoni γ) au o putere de penetrație foarte mare prin roce, practic de ordinul decimetrilor-metrilor, după intensitatea sursei

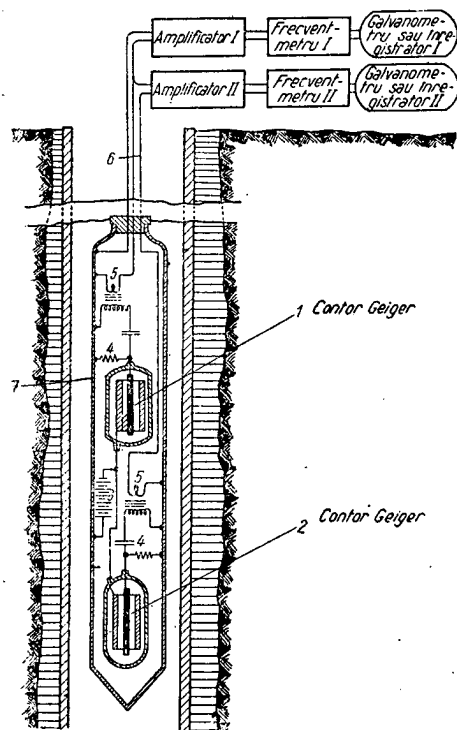


Fig. 14. Reprezentarea schematică a aparatului de carotaj gamma cu contori Geiger:
1 și 2 — contori Geiger-Müller; 3 — bateria de alimentare; 4 — celula de filtrare; 5 — transformatori (la aparatele moderne, preamplificatori); 6 — conductori; 7 — carcasa aparatului.

și după opacitatea prezentată de rocele de pe parcurs. Radiațiile cosmice, prezente în primii 60—100 m de la suprafața ai scoarței, deși cu o putere de penetrație considerabil mai mare ($\lambda = 2 \cdot 10^{-12} \dots 2 \cdot 10^{-14}$, $f = 1,5 \cdot 10^{22} \dots 1,5 \cdot 10^{24}$), nu au nicio utilitate pentru studiul zăcămintului, din cauza originii lor exterioare litosferei (în parte siderală, în parte ionosferică), ci, dimpotrivă, turbură mult carotajul radioactiv cu radiații γ al pături subțiri în care ele sînt prezente.

Carotajul radioactiv al sondelor, în special al celor tubate, folosește determinarea con-

tinuă a variației intensității relative (de la formație la formație și pe intervale, uneori, foarte restrinse) a radiației γ . Pentru ridicarea curbei respective se folosesc aparate de felul celui reprezentat schematic în fig. 14.

Aparatul folosește unul sau doi contori Müller, care determină intensitatea de ionizare produsă de radiația γ prin frecvența impulsurilor de încărcare-descărcare a tubului Geiger. De obicei, pentru nivelarea efectului de «întimplare», care produce virfuri de de detaliu pe curbă, fără legătură directă cu intensitatea cimpului de descărcare, aparatul are două tuburi Geiger cuplate în paralel. La aparatele moderne, transformatorul este substituit printr-un preamplificator. Impulsurile emise și preamplificate sînt transmise la zi, unde, după o nouă amplificare, sînt redresate și descărcate printr-o celulă de descărcare, alcătuită dintr-o rezistență de valoare mare, cuplată în paralel cu un condensator. Tensiunea de echilibru la bornele rezistenței este proporțională cu frecvența impulsurilor, astfel încît ea poate fi măsurată cu galvanometrul. Prin sporirea valorii condensatorului și a valorii rezistenței se obține o sporire a constantei de timp a celulei și o nivelare a efectului de «întimplare» menționat, care, altfel, alterează curba prin suprapunere a unor virfuri mici, dar foarte numeroase, întimplătoare deseori, reale uneori (neregularități ale crustei de noroi sau chiar ale coloanei). Profilele de intensitate a radiației γ naturale a rocilor prezintă, de obicei, maxime la nivelul marelui și al argilelor care încadrează nisipurile sau calcarele petrolifere și minime în dreptul acestora, îndeosebi la calcare (v. fig. 15 și Vol. I, Carotajul radioactiv și neutronic).

D. SATURAȚIA ÎNȚIALĂ A ZĂCĂMINTELOR

a. Distribuția saturațiilor diferitelor fluide

Distribuția saturațiilor diferitelor fluide în spațiile goale ale zăcămintului, înainte de deschiderea lui prin sonde, este rezultatul unui complex de factori: condițiile de migrație și de punere în zăcămint, caracteristicile fizice și fizico-chimice ale fluidelor și (eventual) ale solidelor care saturează porii, condițiile de temperatură și de presiune din zăcămint și caracteristicile fizico-chimice ale rocilor colectoare.

Condițiile de migrație localizează zona de saturație cu hidrocarburi la distanțe limitate de calea de punere în loc, falie sau accident tectonic echivalent, zonă de difuziune, etc. Condițiile de punere în zăcămint, forma și gradul de etanșeitate al rocilor de etanșare (v. Cap. III A.b.) limitează, de asemenea, zona de saturație utilă cu hidrocarburi. Limitarea nu este totală; ea poate fi, uneori, intens selectivă. De exemplu, unele roce-acoperiș

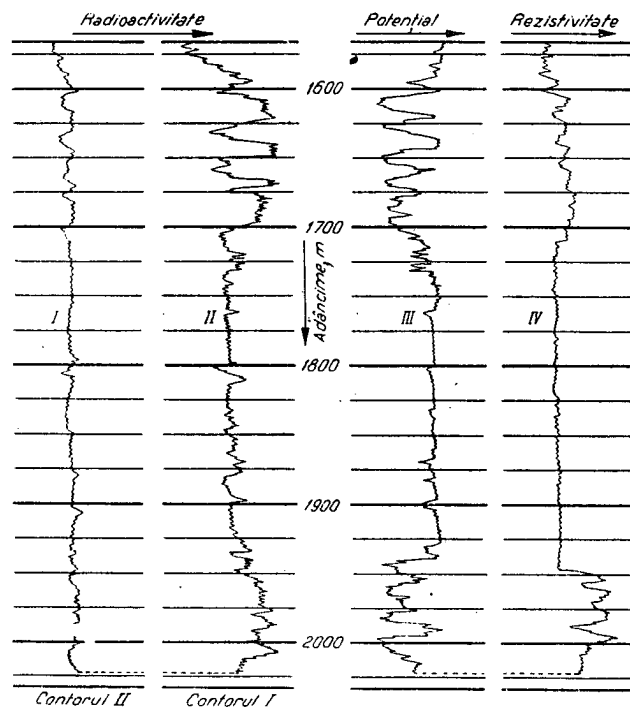


Fig. 15. Comparația a două curbe de profil al intensității radiației γ naturale, la două sonde vecine, față de curbele de carotaj electric clasic: I — curbă de radiație γ — aparat de sensibilitate mică; II — curbă de radiație γ — aparat de sensibilitate, sporită; III — curbă de potențial spontan; IV — curbă de rezistivitate.

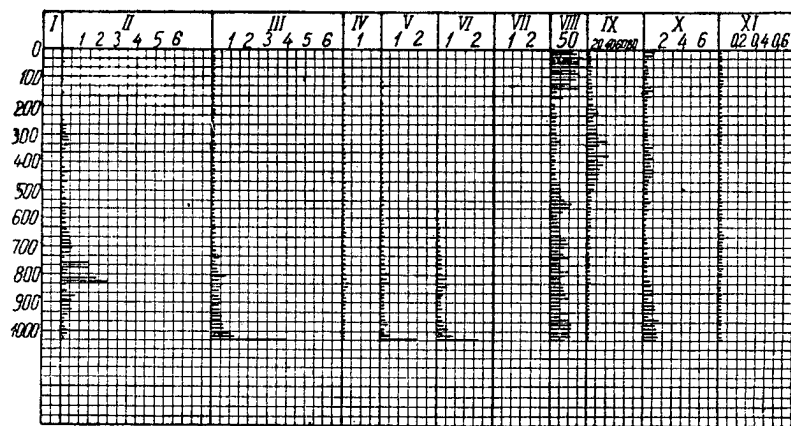


Fig. 16. Profil de conținut de hidrocarburi ușoare și de hidrocarburi grele într-o gaură de sondă (profilul este limitat la adâncimea efectivă atinsă de sondă, înainte de deschiderea stratului productiv de țitei):

I — adâncimea; II — conținutul în H, în miimi de procent ponderal; III — conținutul total în hidrocarburi, în miimi de procent ponderal; IV — conținutul în metan, în miimi de procent ponderal; V — conținutul în etan-propan-butani, în miimi de procent ponderal; VI — conținutul în hidrocarburi condensabile ($C_5 - C_{10}$), în miimi de procent ponderal; VII — conținutul în hidrocarburi grele (C_{11} și peste); VIII — procentul de nisip; IX — procentul de carbonați (ca $CaCO_3$); X — procentul de sulfuri; XI — procentul de cloruri (inclusiv bromuri-ioduri).

sînt practic impermeabile pentru hidrocarburi cu greutatea moleculară relativ mare și conservă astfel zăcăminte de «țitei» mai mult sau mai puțin asociat și cu gaze, dar lasă să migreze (la scară de timp geologică) fracțiunile ușoare. Această explicație este dată de unii autori, existenței de saturații detectabile cu hidrocarburi ușoare și cu hidrogen, a formațiilor care acoperă multe dintre zăcămintele de țitei, cum și, uneori, existenței de strate exploatabile sau nu, cu gaze sau cu gaze și condensat, deasupra multora dintre zăcămintele de țitei. Fenomenul este atît de frecvent, încît poate fi folosit pentru cercetări de semi-explorare v. fig. 16. Se observă repartitia pe verticală în ordinea greutăților moleculare, respectiv a vitezelor de difuzare.

Caracteristicile fizice ale fluidelor limitează și ele selectiv zonele și raporturile de saturarea. Capacitatea unora dintre fluide de a adera mai intens la suprafața rocilor, exprimată curent prin capacitatea de udare (umidibilitatea roci de către fluidul respectiv) sau, mai exact, prin unghiul de contact (v. Cap. V.F.j.), limitează posibilitatea celorlalte fluide de a satura roca.

În cazul prezenței simultane de apă și de hidrocarburi lichide, deoarece apa aderă practic totdeauna mai intens, ea împiedică saturația de către țitei a roci. Fenomenul este cu atît mai intens, cu cît dimensiunile porilor sînt mai mici (v. Cap. V.F.j.) astfel încît rocele cu elemente foarte fine sînt practic oleofobe, fiind saturate aproape totdeauna cu apă și impermeabile pentru țitei. Cu titlu de excepție, datorită gradientilor locali de presiune și prezenței în țitei sau în rocă a unor corpi cu molecula heteropolară modificînd intens echilibrul forțelor superficiale, se pot cita cîteva exemple de roce cu compoziție fină, sensibil saturate cu țitei, situate, în general, în apropierea unor roce cu calități colectoare slabe sau chiar bune, însă în regiuni cu condiții generale de acumulare foarte favorabile, ca: unele marne nisipoase-aleurite din Ponticul regiunii Est-Moreni (Bana), unele aleurite din Meoșianul Intermediar de la Gura Ocnitei și unele nisipuri marnoase din Ponticul regiunii Păcu-reți, care, deși fac excepție din punct de vedere formal de la regula enunțată, prezintă importanță economică, în general, foarte redusă. Afară de condițiile de migrație, care, împreună cu proprietățile fluidelor (greutate moleculară și, deci, viteză de difuziune) limitează selectiv migrarea și, deci, saturarea rocilor, un efect asemănător este atribuit și fenomenelor de adsorbție selectivă, care fixează mult mai intens unele hidrocarburi. Se atribuie o astfel de origine unor țiteiuri sensibil decolorate (Breaza, Cîmpeni-Pirjol, etc.), care saturează unele roce colectoare situate la adîncimi mult prea mici pentru a li se atribui o selecțiune de fază prin comportare retrogradă, deși posibilitatea separației la adîncime mare și a punerii

în loc, posterior separației, rămîne de considerat.

Condițiile diferite (eventual mult, în zăcămintele de dimensiuni mari) de presiune și de temperatură pot provoca diferențieri sensibile, atît în interiorul fazei unice (lichid sau gaz) de hidrocarburi, cît și în compoziția fazelor de hidrocarburi în echilibru.

b. Efectul umidibilității selective

Efectul umidibilității diferite a roci de către fluidele saturante (în general, în ordinea de preferință: apă-țitei-gaze) face ca, practic, nicio rocă colectoare să nu fie lipsită de apă. Originea apei este, în general, anterioară punerii în loc a țiteiului (la zăcămintele secundare) și, în mod excepțional, simultană (la zăcămintele primare *). Distribuția unei faze umezitoare a roci în porii acesteia poate fi: de saturație totală, de saturație parțială dar continuă (distribuție funiculară) și de saturație parțială discontinuă (distribuție pendulară). Pentru ultimele două moduri de distribuție, reprezentarea schematică este dată în fig. 17, pentru simplificare, în cazul unei roci fictive (v. Cap. II.B.b.1). Într-o rocă reală, distribuția este în detaliu mai variată, însă, statistic și local, poate predomina unul sau altul dintre cele două moduri de distribuție.

c. Zone de apă, de țitei și de gaze libere

Din cauzele menționate, saturația unui zăcămînt cuprinde, în cazul cel mai general, trei zone saturate predominant cu una dintre fazele: apă-țitei-gaze. Datorită separației gravi-

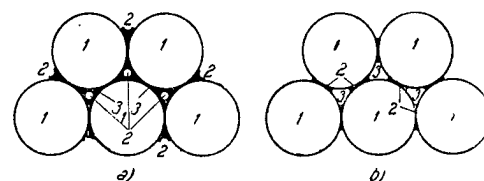


Fig. 17. Reprezentarea schematică a distribuției continue și a distribuției discontinue a fazei umezitoare într-o rocă fictivă:

a) distribuția funiculară (continuă) a fazei umezitoare: 1 — boabele de nisip; 2 — bule de fază umezitoare, distribuite discontinuu; 3 — faza umezitoare continuă; b) distribuție pendulară (discontinuu) a fazei umezitoare: 1 — boabe de nisip; 2 — inele de fază umezitoare la contactul boabelor de nisip, distribuite discontinuu; 3 — fază neumezitoare, distribuită în rețea continuă.

taționale, distribuția lor cu adîncimea este cea indicată, în sens ascendent. Datorită efectului umidibilității selective, saturația în apă nu scade în nici una dintre zone sub o valoare-limită de ordinul 20 — 40%. (~ 23%, în fig. 18). În fig. 18 este dată distribuția cu adîncimea a saturațiilor în apă-țitei-gaze libere

*) Numirile «secundar» și «primar» se referă la modul de punere în zăcămînt și nu la vîrsta geologică.

pentru un complex de condiții speciale. Zona inferioară cuprinde porțiunea de zăcămint cu distribuție continuă a fazei umezitoare, apa. Zona medie cuprinde porțiunea cu distribuție continuă a fazei neumezitoare, țițeiul (corespunzătoare fig. 17, b). Zona superioară cuprinde porțiunea cu distribuție continuă a fazei neumezitoare (gaze libere, cea umezitoare fiind tot apă). Între ele se situează zonele de tranziție respective: apă-țiței, cu distribuția de tranziție între cea de saturație totală, cea de tip *a* (țiței în apă) și cea de tip *b* (apă în țiței), respectiv țiței-gaze, de tip complex care, însă, poate fi asimilată cu cea de tip *b*, cu deosebirea că țițeiul trece prin tranziție în gaze. În cazul unei analize detaliate, însă, singura simplificare posibilă este aceea de a considera apa ca fază străină, țițeiul ca fază umezitoare și gazele ca fază neumezitoare, reducând astfel studiul tranziției la tranziția de tipul apă-țiței, păstrând totuși deosebirea că în acest caz nu se mai întâlnește o saturație ireductibilă a fazei umezitoare (țițeiul).

d. Problema determinării zonelor de tranziție

Problema determinării zonelor de tranziție a fost desbătută intens, atât în scopul determinării rezervelor, cât și în scopul determinării cât mai exacte a adâncimilor care trebuie deschise prin perforarea coloanelor, în speranța că, prin anizotropia permeabilității (Cap. III B.b.5), se va putea controla procesul de extracție selectivă din strat a celor trei faze.

Indiferent de valoarea practică a ultimei determinări și de existența reală a unei zone unice de tranziție, care, în cazul zăcămintelor cu eterogeneitate litologică (intercalații alternate de roce cu caracter de saturabilitate diferit), este mai puțin verificată, încercările de producție din zonele de tranziție au pus în evidență afluxuri polifazice, ceea ce implică, pe porțiunea perforată respectiv, existența unor saturații polifazice. Fig. 18 reprezintă o încercare de calcul al grosimii zonelor de tranziție și al alurei de variație a raportului saturațiilor de-a lungul lor, bazată pe caracteristicile unui nisip particular, cu compoziție granulometrică medie, pe o diferență de densitate între apă și țiței de $0,3 \text{ g/cm}^3$, respectiv între țiței și gaze de $0,5 \text{ g/cm}^3$, și pe o tensiune interfacială apă-țiței de 30 dyne/cm , respectiv țiței-gaze de 20 dyne/cm . Distanța dintre cele două zone de tranziție nu depinde de caracteristicile roci sau ale fluidelor, ci de raporturile cantitative dintre fazele prezente în zăcămint, în special de raportul dintre volumul de țiței și volumul de pori total al zăcămintului, cum și de întinderea acestuia în proiecție orizontală. Îndeosebi, în cazul prezenței unei cantități foarte mici de țiței, cele două zone pot fi apropiate până la un început de suprapunere (fig. 19), de unde rezultă că, parcurgând ascendent zăcămintul, tranziția țiței-gaze începe înainte

de a se fi determinat tranziția apă-țiței. Un caz extrem al acestei condiții este acela al absenței țițeiului (zăcămintele de gaze), când tranziția devine de tipul apă-gaze.

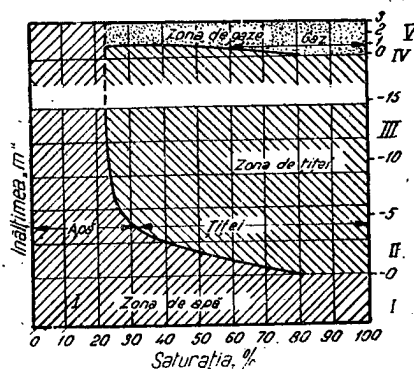


Fig. 18. Distribuția saturațiilor pe verticală într-un zăcămint de țiței cu gaze libere, în condiții particulare: I — zona de saturație totală cu apă; II — zona de tranziție apă-țiței; III — zona de saturație preponderentă cu țiței; IV — zona de tranziție țiței-gaze; V — zona de saturație preponderentă cu gaze libere.

Din calculele de aceeași natură, efectuate în condițiile altor zăcămint, s-a putut trage concluzia, verificată în parte, experimental, prin probe de producție și prin analiza de carote extrase în condiții conservative, că înălțimea zonei de tranziție gaze-țiței nu depășește în rocele colectoare obișnuite 2–3 m (excepții

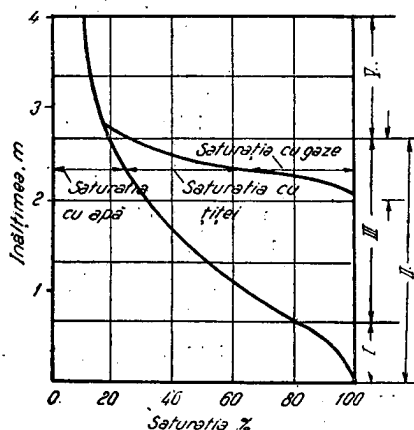


Fig. 19. Distribuția saturațiilor pe verticală într-un zăcămint de gaze și de țiței, în care țițeiul este cantitativ subordonat:

I — zona de saturație totală cu apă; II — zona de tranziție apă-țiței; III — zona de saturație preponderentă cu țiței; IV — zona de tranziție țiței-gaze; V — zona de saturație preponderentă cu gaze libere.

în cazul rocilor cu compoziția granulometrică foarte fină și al tensiunilor interfaciale mari) sau aceea a zonei apă-țiței, circa 3–8 m (excepții în aceleași cazuri speciale). În cazul rocilor

neomogene din punct de vedere granulometric sau litologic, evident, zonele de tranziție se pot extinde prin reproducere.

e. Neuniformitatea compoziției în cadrul fiecăreia dintre faze

Metodele de calcul al compoziției fazelor în echilibru date în Cap. IV A.c. se bazează pe ipoteza echilibrului termodinamic obișnuit, cu egalitatea presiunii și a temperaturii în toate punctele sistemului. Zăcămintele de hidrocarburi, însă, constituie sisteme de dimensiuni mari, situate în câmpul gravitațional terestru, astfel încât echilibrul lor hidrodinamic presupune o uniformitate a presiunii reduse (Cap. II A.e) și nu a celei efective. Fiind situate în câmpul termic terestru, ele nu se găsesc în echilibru termic static, ci dinamic. Consecința acestei variații a presiunii efective și a temperaturii în zăcămint este o neuniformitate a compoziției fiecăreia dintre fazele în echilibru termodinamic. Experiența confirmă această neuniformitate, iar variabilitatea constatată este sensibilă.

Considerind, pentru simplificare, sistemele din zăcămint ca sisteme cu temperatură constantă și în ipoteza aplicării legilor soluțiilor ideale (v. Cap. IV A.e), studiul echilibrului termodinamic stabilește următoarea lege de variație a concentrației fiecărui component al sistemului în funcție de adâncime:

$$\left(\frac{\partial z_i}{\partial h}\right)_T = \frac{z_i}{RT} \left(\frac{MV_i}{V_i} - M_i\right), \quad (12)$$

în care:

- z_i — concentrația moleculară globală a componentului i în sistem;
- h — adâncimea, în m;
- M — greutatea moleculară medie a sistemului;
- M_i — greutatea moleculară a componentului i ;
- V — volumul specific molar (mediu) al sistemului, în m^3/kmol ;
- V_i — volumul specific molar (mediu) al componentului i , în m^3/kmol , $\left(\frac{\partial V}{\partial m_i}\right)$;
- m_i — numărul de kmoli de component i al sistemului;
- R — constanta universală molară a gazelor;
- T — temperatura absolută a sistemului.

Pentru un țiței mediu, pentru care elementele din relația (12) au fost disponibile, s-a calculat variația compoziției z_i cu adâncimea, în condițiile de temperatură $t = 71,1^\circ\text{C}$ (fig. 20) și $t = 104,4^\circ\text{C}$ (fig. 21), și variația cu adâncimea, a concentrației în metan a sistemului metan + n-butan în faza lichidă, la $t = 104,4^\circ\text{C}$ (fig. 21) și în faza gazoasă, la $71,1^\circ\text{C}$ (fig. 22).

Alurile de variație a concentrației reprezentate în fig. 20—22, de valoare strict orientativă, sînt în realitate diferite, din cauza variației temperaturii, care, în condițiile obișnuite, tinde mai degrabă să exagereze variația compoziției decît să o compenseze.

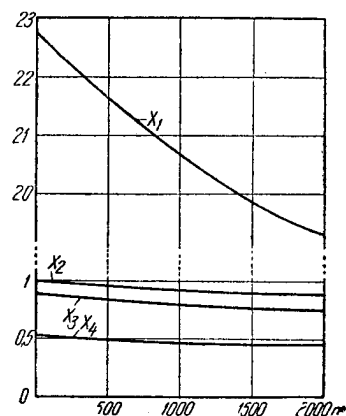


Fig. 20. Variația concentrației molare x_i de alcani inferiori, în faza lichidă a unui țiței mediu, la $t = 71,1^\circ\text{C}$, în funcție de adâncime (condiția de limită $x_0 = 22,7\%$ moli metan, la $h = 0$).

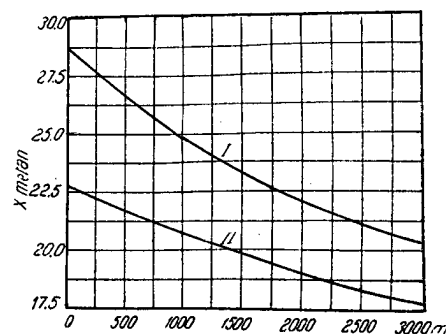


Fig. 21. Variația, în funcție de adâncime, a concentrației molare x_i a fazei lichide în metan (I) a țițeiului reprezentat în fig. 20 și II a sistemului metan-n-butan de concentrație globală molară 28,7% metan, la $t = 104,4^\circ\text{C}$.

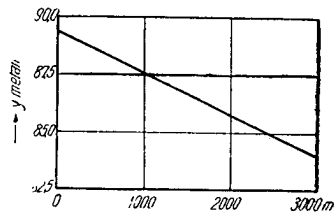


Fig. 22. Variația, în funcție de adâncime, a concentrației de echilibru y_i a metanului, în faza gazoasă a unui sistem meran-n-butan, de compoziție inițială 89,4% moli metan, la $h = 0$, la o temperatură constantă $t = 71,1^\circ\text{C}$.

Dacă se examinează sisteme în condiții mai puțin depărtate de punctul critic, legile soluțiilor ideale nu mai sînt aplicabile, analiza

teoretică a variației compoziției devine laborioasă, iar singura concluzie de interes practic care se poate trage pentru moment este că în condiții apropiate de cele critice se pot întâlni gradientii de concentrații de echilibru termodinamic de ordinul unor multipli ai celor deduși prin relația (12).

E. FENOMENE DE SATURARE ȘI DE DESATURARE

a. Fenomenele de saturare și de desaturare și forțele care le provoacă

Fenomenele de saturare sînt studiate pentru cunoașterea: condițiilor în care are loc punerea în zăcămintă hidrocarburilor, a condițiilor de golire a zăcămintului prin metode primare și a condițiilor de pătrundere în zăcămintă a agenților energetici de deplasare sau de antrenare (exploatare secundară, în sensul larg).

Ele influențează, de asemenea, în măsură sensibilă rezultatele operațiilor de deschidere a stratului (foraj și perforare), cum și operațiile de tratament chimic al sondelor.

Forțele care provoacă aceste fenomene sînt aceleași; deosebirea modului lor de lucru în procesele de saturare-desaturare constă numai în măsura în care unele sau altele sînt preponderente, iar diferența dintre ele se datorește în parte naturii fluidului care pătrunde în roca colectoare și în parte intervalelor de timp în care au loc fenomenele.

Aceste forțe sînt: presiunea rocilor (uniformă sau nu), presiunea de compresie elastică a fluidelor, practic nedisociabilă de cea rezultată din legea $F(P, v, T) = 0$ a sistemului fluid respectiv, pus în condițiile de volum și de temperatură a zăcămintului, presiunea hidrostatică exterioară, forțele gravitaționale acționînd atît ca forțe interioare (greutatea proprie a sistemului de hidrocarburi), cît și ca forțe exterioare (greutatea apei și, în oarecare măsură, și a rocilor acoperitoare) și forțele molecular-superficiale care se nasc la suprafețele de separație dintre diferitele fluide precum și între acestea și rocă.

Datorită faptului că procesul de saturare cu hidrocarburi se petrece la scară de timp geologică, rolul forțelor molecular-superficiale este important în aceste fenomene, uneori chiar preponderent. În același sens influențează și diferențele de tensiune de adeziune dintre fiecare fluid și rocă (mai mare în cazul apei, mai mică în cazul țițeiului), deoarece faza finală a formării zăcămintului constă practic totdeauna într-o deplasare a produselor bituminoase de către apă dintr-o rocă cu structură fină într-una cu structură mai grosolană.

Diferențele de presiune dintre cele două faze, datorite forțelor capilare, fiind mici, gradientii de presiune care provoacă curgerea sînt mici, iar curgerea este foarte lentă, astfel încît efectul lor este sensibil numai într-o durată îndelungată. În procesul de saturare

cu hidrocarburi, aceste diferențe de presiune au timp suficient de acțiune pentru a cauza distribuția de saturații menționată (v. și Cap. V D.a).

În procesul de desaturare (golirea zăcămintului), din cauza valorii lor reduse în comparație cu durata de acțiune, efectul lor este deseori neglijabil, fiind practic depășit totdeauna de efectul celorlalte forțe. Indiferent de originea presiunii, compensarea parțială a scăderii ei în urma sporirii volumului sistemului (extracție de hidrocarburi din strat) se produce în unele regimuri prin deplasarea suprafeței de contact cu fluidele din zonele saturate predominant cu apă sau cu gaze libere, iar în alte regiuni, prin deplasarea suprafeței de contact cu roca învecinată sau prin sporirea volumului bulelor de gaze eliberate din soluție, ocluse în țiței.

După modul de acționare a diferitelor cauze de compensare parțială a pierderii de presiune de zăcămintă rezultată din producție, se disting diferite «regimuri» de lucru (energetice) ale zăcămintului. Deși cauzele menționate nu acționează izolat, într-un singur mod, pentru ușurința studiului se obișnuiește să se analizeze izolat diferitele moduri de lucru, ca și cum regimurile respective ar fi regimuri pure. La interpretarea finală a fenomenelor de exploatare nu trebuie omis faptul că aceste regimuri sînt totdeauna mixte, unul sau mai multe fiind preponderente.

b. Clasificarea regimurilor energetice de golire a zăcămintelor

Clasificarea regimurilor de golire a zăcămintelor poate fi făcută din diferite puncte de vedere. De reținut sînt:

- clasificarea după mecanismul de compensare a căderii de presiune — mai simplă, utilă pentru studiul fizic al zăcămintului — și
- clasificarea generală, după mecanismul menționat și după fixitatea sau după mobilitatea contururilor zonei petrolifere (în proiecție orizontală), ținînd seamă și de alura de variație a presiunii, în funcție de coeficientul de golire a zăcămintului, coeficient de extracție (clasificarea după Crîlov, Glogovski și Nicolaevski).

1. Clasificarea după mecanismul compensării căderii de presiune cuprinde: regimuri cu dezlocuire externă, regimuri gravitaționale și regimuri de epuizare.

a) *Regimurile cu dezlocuire externă* cuprind regimurile cu împingere de apă și regimurile cu împingere de gaze din zona de gaze libere. În cazul cînd împingerea apei nu este întreținută de greutatea unei coloane de apă avînd o înălțime suficientă pentru depășirea presiunii dinamice a zăcămintului, ci de expansiunea elastică a zonei acvifere de dimensiuni foarte mari a zăcămintului, care are și o închidere perfectă, regimul rezultat poate fi clasificat, prin tranziție printre regimurile de epuizare.

b) *Regimurile gravitaționale* cuprind, în principiu regimurile alimentate de greutatea proprie a hidrocarburilor și, numai în particular (tranzitional, din punctul de vedere formal al clasificării), pe cele alimentate de greutatea unei coloane de apă în contact marginal cu țițeiul, coloană de apă nealimentată de la exterior.

c) *Regimurile de epuizare* cuprind regimul cu compensare parțială prin deten-ta elastică a țițeiului, regimul cu detentă elastică a apei (tranzitional, v. regimuri cu dezlocuire externă) și regimuri cu compensare parțială a căderii de presiune prin expansiunea gazelor ocluse în țiței, după eliberare din soluție.

Dintre regimurile efective, mixte, cele care prezintă importanță, din cauză că sînt întîlnite frecvent și au efecte economice, sînt: regimul cu împingere de apă, regimul cu împingere de gaze și regimul cu expansiunea gazelor eliberate din soluție.

În decursul procesului de exploatare, regimul energetic al zăcămintului are tendințe naturale de a-și schimba caracteristicile: în faza inițială tind să predomine efectele expansiunii elastice a fluidelor și a rocei, în faza următoare, efectele agenților de dezlocuire externă, în faza mai avansată, efectele gazelor eliberate din soluție și, în faza finală, efectele regimului gravitațional (v. Cap. V. G. și I.).

Afară de caracterul mixt al regimurilor reale, datorit improbabilității întîlnirii în natură a condițiilor particulare care să asigure forma pură a regimului, și de tendința de transformare evolutivă naturală a regimurilor unul în altul, caracterul regimului energetic mai este modificat prin modul de conducere a exploataării pentru obținerea unui coeficient de extracție sporit, a debitelor planificate și a unui cost de exploatare redus (v. Cap. VI și VII).

2. *Clasificarea generală, după Crîlov, Glogovski și Nicolaevski* ține seama îndeosebi de factorii naturali și de parametrii de comportare care prezintă importanță la proiectarea tehnico-economică a exploataării zăcămintelor.

Primul criteriu de clasificare îl constituie caracterul proiecției orizontale a conturului zonei petrolifere. După cum această proiecție este fixă sau mobilă, problema proiectării exploataării zăcămintului și, îndeosebi, cea mai importantă parte economică a ei, rețeaua optimă de distribuție a sondelor în zăcămint, se tratează fundamental diferit (v. Cap. VII).

a) *Regimuri cu contururi mobile în proiecție orizontală.* Între acestea se face o primă deosebire după natura resursei principale de energie: regimuri cu împingere de apă, regimuri cu împingere de gaze libere, regimuri gravitaționale și regimuri cu împingere de gaze

eliberate din soluție. După alura variației presiunii la conturul de alimentare (v. Cap. II D.a. 2) în cursul exploataării, există:

— regimuri întreținute cu împingere de apă, la care presiunea la conturul de alimentare este practic constantă, ea fiind egală cu cea hidrostatică a unei coloane de apă alimentată de pinza freatică sau din alte strate acvifere în comunicație cu aceasta (fig. 23, a);

— regimuri elastice cu împingere de apă, de tip gravitațional («elastice», din punctul de vedere al alurii de variație a presiunii) care, spre deosebire de cele întreținute, au coloana hidrostatică respectivă nealimentată, astfel încît presiunea la contur scade pe măsura exploataării *) (fig. 23, b);

— regimuri cu împingere de apă de tipul pur elastic, care, deși au o zonă acviferă de dimensiuni foarte mari (raze de ordinul zecilor de km), fiind complet lipsite de comunicație cu vreo sursă exterioară de apă și compensînd deficitul de volum provocat de extracția țițeiului prin expansiunea elastică a apei și prin contracția elastică a rocei colectoare, prezintă o scădere continuă a presiunii la conturul de alimentare (fig. 23, c);

— regimuri întreținute, cu împingere de gaze, la care, din cauza dimensiunilor foarte mari ale zonei de gaze libere în comparație cu acelea ale zonei petrolifere, deficitul de volum provocat de extracția țițeiului, compensat de creșterea volumului zonei de gaze libere, reprezintă numai o fracțiune foarte mică din acesta, astfel încît presiunea gazelor rămîne practic constantă (fig. 23, d);

— regimuri cu împingere de gaze, de tip elastic, la care zona de gaze libere avînd dimensiuni de același ordin de mărime ca cea petroliferă, presiunea la contur scade în cursul exploataării (fig. 23, e);

— regimuri pur gravitaționale, la care presiunea scade în cursul exploataării, pe măsura epuizării fracțiunii de rezervă de țiței, situată deasupra punctului de deschidere a zăcămintului și de măsurare a presiunii (fig. 23, f). Este de observat că locul unui ipotetic regim cu deplasare de către gazele eliberate din soluție rămîne liber în această grupă a clasificării (regimuri cu contururi mobile), acesta neputînd exista, din cauza contradicției de principiu dintre noțiunea de mobilitate a conturului și cea de acțiune pur internă a gazelor eliberate. Numai după o eventuală separare gravitațională, gazele eliberate pot da o deplasare conturului, însă în acest caz, ele se comportă ca și gazele inițial libere.

*) Se cunosc tipuri intermediare de zăcămintă între cele elastice și cele întreținute, care prezintă caractere de regim întreținut în sezonul cu precipitații atmosferice abundente (iarnă-primăvara) și caractere de regim elastic în restul anului, cînd alimentarea cu apă este deficitară.

Regimuri cu gaze din soluție	Regimuri gravitaționale	Regimuri cu împingere de gaze		Regimuri cu împingere de apă			Regimuri cu contururi mobile în direcție orizontală
		elastice	întreținute	elastice		întreținute	
				elastice și cu împingere de apă	gravitaționale și elastice cu împingere de apă	gravitaționale și cu împingere de apă	
g	f	e	d	c	b	a	

Fig. 23. Reprezentarea schematică a regimurilor energetice de zăcămint cu contururi mobile:
 a — regim de împingere de apă de tipul întreținut; b — regim de împingere de apă de tipul elastic-gravitațional;
 c — regim de împingere de apă de tipul pur elastic; d — regim de împingere de gaze de tipul întreținut;
 e — regim de împingere de gaze de tipul elastic; f — regim pur gravitațional.

<i>g</i>	<i>f</i>	<i>e</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	Regimuri cu contururi fixe în direcție orizontală
Interioare legate de masa fluidului		Forțe exterioare concentrate la suprafața de separație dintre fite și gaze-apă sau rocă limitând zăcămintul					
Elasticitatea gazelor actuse	Gravitatea fiteiului	Elasticitatea gazelor	Presiunea instalației de injectare	Elasticitatea apei și stratului		Gravitatea apei și presiunea instalației de injectare	Caracter forței de strat
Treptată, uniform în tot zăcămintul		Prin înăltarea contactului dela poziția lui inițială până la finală					

Fig. 24. Reprezentarea schematică a regimurilor energetice de zăcămint cu contururi fixe:
 a — regim cu împingere de apă de tipul întreținut; b — regim cu împingere de apă de tipul elastic-gravitațional;
 c — regim cu împingere de apă de tipul pur elastic; d — regim cu împingere de gaze de tipul întreținut;
 e — regim cu împingere de gaze de tipul elastic; f — regim gravitațional; g — regim cu dezlucuire internă, prin
 eliberarea gazelor din soluție.

b) *Regimuri cu contururi fixe în proiecție orizontală.* Între acestea se face o primă deosebire după caracterul forțelor care provoacă drenajul: *forțe exterioare*, în general verticale, care acționează asupra singurei părți mobile a suprafeței zonei petrolifere, suprafața orizontală, respectiv *forțe interioare*, care acționează asupra fiecărui element de volum al zonei petrolifere *).

O a doua deosebire se face din punctul de vedere al naturii forțelor, ca în cazul regimurilor cu contururi mobile. Astfel există:

— regimuri întreținute, cu împingere de apă, la care, suprafața de contact apă-țitiei deplasându-se vertical (v. fig. 24 a în comparație cu fig. 23, a), protecția conturilor în plan orizontal rămâne fixă, iar presiunea la contur rămâne constantă;

— regimuri cu împingere de apă de tip elastic-gravitațional, la care presiunea are aceeași alură de variație ca în cazul corespunzător al regimurilor cu contururi mobile (v. fig. 24, b în comparație cu fig. 23, b);

— regimuri pur elastice, cu împingere de apă (v. fig. 24, c în comparație cu fig. 23, c), cu variația presiunii analoagă celeia a regimului corespunzător cu contururi mobile;

— regimuri cu împingere de gaze, de tip întreținut, (v. fig. 23, d, în comparație cu fig. 23, d), cu presiune constantă; (acest tip de regim este practic inexistent în condițiile naturale, el întâlnindu-se în mod frecvent în cazul zăcămintelor la care exploatarea se face cu mentinerea presiunii prin injecție de gaze);

— regimuri cu împingere de gaze, de tip elastic (v. fig. 24, e în comparație cu fig. 23, e), la care presiunea scade, ca în cazul regimului corespunzător cu contururi mobile;

— regimuri pur gravitaționale, la care presiunea de fund a sondelor este practic constantă și apropiată de cea atmosferică, debitele sînt foarte mici și de o constanță remarcabilă (cu excepția perioadei inițiale, cînd regimul nu este pur) (v. fig. 24, f);

— regimuri cu golire prin acțiunea gazelor eliberate din soluție, la care alura de variație a presiunilor se apropie de aceea a regimurilor elastice cu împingere de gaze, cu care, de altfel, ele sînt asociate și către care ele tind totdeauna să se transforme prin separarea gravitațională **).

F. CONDIȚIILE CURGERII ETEROGENE

a. Permeabilități efective

Legile de curgere stabilite prin ecuațiile (22) din Cap. III sînt valabile numai pentru curgerea laminară a unei faze unice într-un

*) Trebuie observat că atributul «interioare» dat efectelor gravitației (acțiunea maselor terestre asupra maselor lichide din zona petroliferă) este inexact din punct de vedere formal al mecanicii raționale, însă satisface din punctul de vedere al clasificării adoptate, care de fapt, are în vedere forțe cu acțiune periferică și forțe cu acțiune distribuită uniform asupra volumului.

**) Pentru caracteristicile generale ale regimurilor, a se vedea Cap. V (G. și I.).

mediu poros, saturat integral cu acea fază. Această situație se întâlnește numai ca un caz particular, limitat atît în timp cît și în spațiu. Dacă se încearcă aplicarea ecuațiilor menționate, la curgerea prin medii poroase saturate cu mai multe faze, se constată o necorespondență între debitele de fluid calculate (prea mari), în comparație cu cele efective (mai mici).

Diferențele se datoresc:

1. necorespondenței condițiilor de curgere (fazele prezente simultan nu se găsesc la aceeași presiune, chiar în puncte infinit apropiate (efectul presiunilor capilare v. Cap. V F. d., j și k.), secțiunile de trecere sînt cu totul altele decît celea din cazul saturației cu fază unică, chiar altele decît celea care ar rezulta din împărțirea secțiunilor libere ale canalelor de pori în mod proporțional cu saturația în fazele prezente);

2. unor fenomene secundare, ca: alterarea structurii mediului poros (v. Cap. VI A. b.) și fenomenele de alunecare (în cazul gazelor, v. Cap. VI A. b.).

Pentru a putea folosi ecuațiile (22) din Cap. III și toate consecințele lor hidrodinamice, se introduce noțiunea de permeabilitate efectivă κ , a mediului poros față de fluidul respectiv, aceasta fiind valoarea care, substituită în locul lui k din ecuația (22) din Cap. III, satisface aceste ecuații. Prin aceasta, însă, ecuațiile (22) din Cap. III trebuie scrise față de fiecare dintre fazele prezente, pentru vitezele, respectiv debitele fazei corespunzătoare. Permeabilitatea efectivă, mărime de aceeași dimensiune $[L^2]$ ca și cea absolută, nu mai este caracteristică numai mediului poros, ci și fluidului respectiv. Chiar pentru același mediu și pentru același fluid, ea variază între zero și valoarea permeabilității absolute a mediului, în primă aproximație numai în funcție de saturația mediului poros cu faza corespunzătoare. Studiul experimental mai exact arată că ea este în funcție și de distribuția fazei discontinue în cea continuă, în porii mediului, de tensiunea interfacială dintre fazele prezente, de tensiunile de adeziune ale fazelor la suprafața solidului mediului poros, de evoluția anterioară a saturației cu fazele prezente (efecte de histerezis capilar), de gradientii de presiune aplicați și de factori mai puțin importanți, ca: forma, dimensiunile și structura spațiilor de pori și altele.

În cazul proceselor de curgere eterogenă nestabilizate (cu variația în timp a saturațiilor roci în fazele prezente), permeabilitatea efectivă mai depinde și de modul în care are loc variația saturației.

Din acest punct de vedere, se cunosc următoarele tipuri de procese de desaturare, care dau naștere unor permeabilități efective diferite: a) desaturare sub diferență de presiune capilară; b) desaturare sub deplasarea dinamică; c) desaturare în regim de eliberare a gazelor din soluție.

Deși deosebirea este făcută inițial, pe baza procedurilor de laborator folosite pentru realizarea unei saturații (și distribuții a ei) variabile pentru măsurarea permeabilității efective, procesele sînt întîlnite în mare parte, individualizat, chiar în procesele de golire a zăcămintelor. De exemplu tipul (a) este întîlnit predominant în regiunile din vecinătatea contururilor zonei petrolifere, în faza inițială a procesului de golire, și în parte ulterior. Tipul (b) este întîlnit în fazele finale și îndeosebi în cazul aplicării metodelor de exploatare secundară (în sensul restrîns, spălării). Tipul (c) este întîlnit predominant în cazul zăcămintelor în regim cu gaze eliberate din soluție, după ce presiunea de zăcămintă a scăzut sub cea de început de fierbere. Schematic, cele trei tipuri

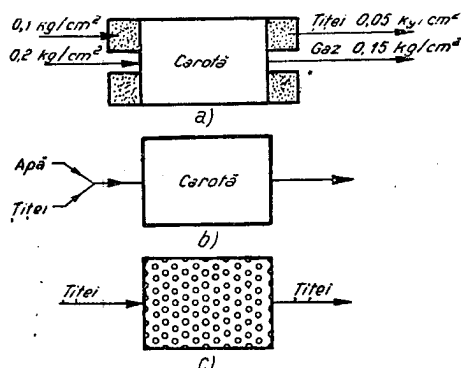


Fig. 25. Reprezentarea schematică a celor trei tipuri de desaturare folosite pentru studiul permeabilității efective: a) — desaturare sub diferență de presiune capilară între faze; b) — desaturare sub deplasare dinamică; debit bifazic cu raport de debite monofazice reglat prin injectare; c) — desaturare prin eliberarea de gaze din soluție; carotă saturată, cu țței saturat cu gaze, de exemplu la 20 kg/cm² saturație inițială, căreia, prin scăderea presiunii, i s-a creat o saturație dorită (de exemplu 5 %) în gaze libere și în care apoi se injectează țței pentru determinarea permeabilității efective.

de desaturare care dau naștere la permeabilități efective diferite, pot fi reprezentate ca în fig. 25.

Determinarea curbelor permeabilităților efective pentru fiecare rocă fiind o operație lungă, chiar pentru o singură rocă, s-a încercat cu oarecare succes generalizarea rezultatelor obținute pe câteva roce tip (nisipuri așa-numite necimentate, nisipuri cimentate și calcare cu structură granulară). Cea mai mare parte a materialului experimental disponibil se referă la nisipurile necimentate sau slab cimentate și sînt obținute prin studiul proceselor de tipul (b), deși cele de tipul (a) prezintă o tendință de răspîndire recentă.

Pentru simplificarea studiului, în majoritatea cazurilor, s-au cercetat curgerile bifazice: lichid + gaz sau lichid + lichid (nemiscibile). În același scop s-a recurs la exprimarea permeabilității efective sub formă de fracțiune din

permeabilitatea absolută. Se obține, astfel, permeabilitatea relativă a mediului poros față de faza respectivă, mărime adimensională. Dacă se notează cu κ (κ_{eff}) permeabilitățile efective și cu k , afectat de indicele corespunzător, permeabilitățile relative, se obține, conform definiției,

$$k_t = \frac{\kappa_t}{k} \text{ pentru țței; } k_a = \frac{\kappa_a}{k} \text{ pentru apă;}$$

$$k_g = \frac{\kappa_g}{k} \text{ pentru gaze.} \quad (13)$$

b. Permeabilitatea efectivă a rocilor față de sistemele apă + țței

Această permeabilitate a fost studiată îndeosebi prin procesele de tipul (b) cu aparatura al cărei prototip este cel reprezentat fig. 26. Nisipul analizat introdus în celula permeametrică 1 (v. și fig. 27) este traversat de amestecul țței + apă provenit din recipientul C, respectiv B, sub acțiunea presiunii apei din conducta de alimentare, și cules în biureta de măsură 2. Diferența de presiune dintre două secțiuni vecine cu fețele de intrare-ieșire ale probei este dată de manometrul diferențial 3. Cu relațiile (14) și (15) se determină permeabilitățile efective κ_t și κ_a , iar cu relațiile (13), (14) și (15) se determină permeabilitățile relative k_t și k_a :

$$Q_t = \frac{\kappa_t}{\mu_t} \cdot F \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (14)$$

și

$$Q_a = \frac{\kappa_a}{\mu_a} F \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (15)$$

în care

Q_t și Q_a sînt debitele-volum de țței, respectiv apă, în cm³/s;

κ_t și κ_a — permeabilitatea efectivă a rocii față de țței, respectiv de apă, în darcy;

μ_t și μ_a — viscozitatea țțeiului, respectiv a apei, în cP;

F — secțiunea de trecere a celulei 1, în cm²;

ΔP — diferența de presiune indicată de manometrul 3;

ΔL — lungimea de parcurs a amestecului, între secțiunile la care se măsoară presiunea de către 3.

Saturația cu apă (sărată) a probei este determinată electric prin determinarea rezistivității ei. În acest scop, celula 1, reprezentată în fig. 26, este dotată cu inele de bronz echidistante (v. fig. 27) care constituie electrozi pentru măsurarea rezistenței fiecăruia dintre cele șase segmente în care este divizată proba. Rezistența este măsurată cu ajutorul potențiometru-

trului ρ , prin comparație cu o rezistență variabilă etalonată. Segmentele terminale ale probei

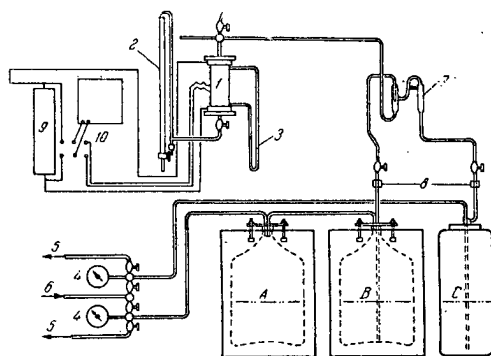


Fig. 26. Schema instalației de determinare a permeabilităților efective prin saturare sub debite controlate (tip b; ref. F.a.2):

1 — celula permeametrică; 2 — biureta de recoltare a fluidelor ieșite din probă; 3 — manometru diferențial; 4 — manometru; 5 — legături de evacuare; 6 — legătura de alimentare cu apă; 7 — cameră de control al amestecului; 8 — filtre; 9 — potențiomtru; 10 — voltmetru electronic; A — vas tampon; B — vase de alimentare cu apă sărată; C — vase de alimentare cu țiței.

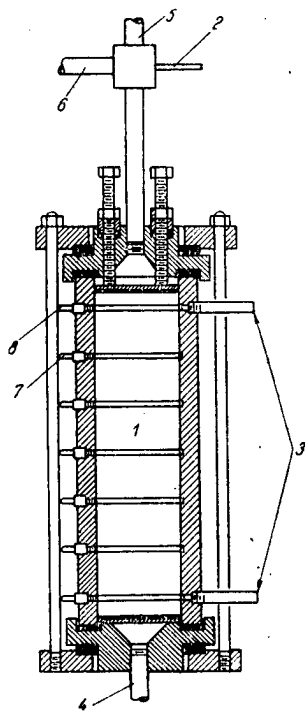


Fig. 27. Schema celulei permeametrice pentru determinarea permeabilității efective:
1 — probă; 2 — legătura de intrare a amestecului; 3 — legătura la manometrul diferențial; 4 — ieșirea amestecului; 5 — legătura piezometrică pentru presiunea de dezlocuire; 6 — sondă termometrică; 7 — electrozi pentru măsurarea rezistenței; 8 — electrozi care îndeplinesc și funcțiunea de prize de presiune (inele piezometrice).

sînt eliminate atît din măsurile de rezistivitate, cît și din cele de presiune, pentru eliminarea efectelor de capăt.

Din cercetări prealabile asupra unei probe de aceeași natură, se cunoaște legea de variație a rezistivității, în funcție de saturație (v. fig. 28), astfel încît determinarea saturației este practic instantanee (v. ecuația 20 din Cap. III).

Prin începerea operației în situația $S_a = 1,00$, se determină suprapresiunea necesară pentru a face să pătrundă țițeiul (faza neumezitoare) în carotă, așa numita « presiune de dezlocuire », prin determinarea înălțimii stabile a unei coloane de țiței din tubul de sticlă legat la 5 (fig. 27) și prin compararea ei cu înălțimea coloanei de apă din biureta (fig. 26). După determinarea acesteia, se umple cu nisip și porțiunea superioară (de distribuție) a celulei și se începe injectarea cu debit constant de țiței și de apă, notîndu-se debitele, presiunile și rezistențele electrice stabilizate. Pentru verificarea stabilității regimului atins,

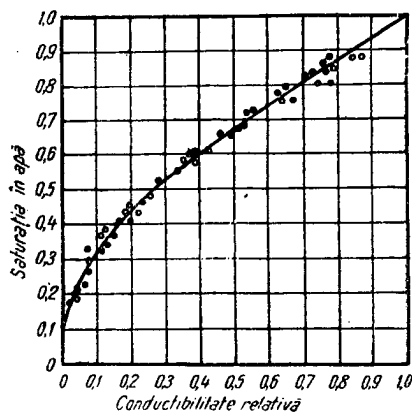


Fig. 28. Diagramă de calibrare: rezistivitate-saturație valori relative.

măsurătorile sînt repetate, dar pentru studiul distribuției saturației, măsurătorile de rezistență se efectuează separat pe cele șase porțiuni de probă cuprinse între doi electrozi inelari consecutivi.

Operațiile durează mult (o serie completă durează cîteva săptămîni) și dau rezultate valabile aproximativ pentru nisipul cercetat. Variația permeabilității relative față de apă, cu scăderea treptată a saturației S_a de la 1 către 0, are aspectul din fig. 29, care cuprinde rezultatele unei serii de experiențe efectuate pentru determinarea efectului viscozității, efect practic neglijabil, punctele situîndu-se aproximativ pe o curbă continuă cu scădere rapidă în gama $1 < S_a < 0,7$, mai lentă la saturații mai mici, însă cu ordonată (permeabilitate) nulă de la o anumită valoare (0,3—0,1) a saturației S_a (saturația ireductibilă) în jos.

Analog, fig. 30 reprezintă variația k_t în cursul reducerii lui S_a . Se observă că în gama de la $S_a = 1,0$ pînă la $S_a = 0$, pînă la o valoare caracteristică probei, de ordinul 0,85, permeabilitatea față de țitei a probei este nulă și că numai după ce proba a atins o anumită saturație cu țitei, ea prezintă o permeabilitate

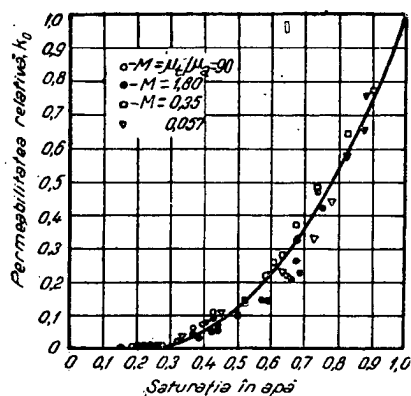


Fig. 29. Variația permeabilității relative, față de apă la reducerea saturației cu apă ($M = \mu_t / \mu_a$, raportul viscozităților).

finită care crește la început încet și apoi repede. Imposibilitatea de a reduce saturația de apă sub limita menționată se traduce în figură prin întreruperea curbei din fig. 30 în punctul de $S_0 = 0,15$.

Se observă că curgerea fazei neumezitoare nu se produce decît dacă se aplică probei o

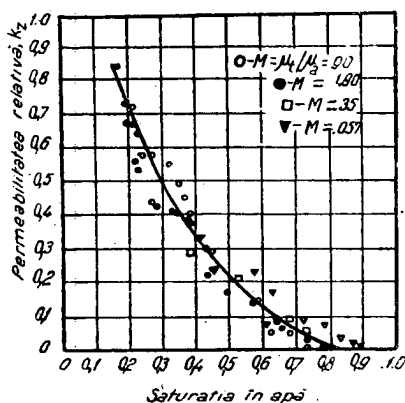


Fig. 30. Variația permeabilității relative față de țitei la reducerea saturației cu apă ($M = \mu_t / \mu_a$, raportul viscozităților).

diferență de presiune mai mare decît « presiunea de dezlocuire »; chiar după aceea nu se observă o curgere efectivă (cu ieșire) a țiteiului decît după ce saturația medie cu țitei a probei a atins o anumită valoare S'_t de ordinul

0,10–0,20. În toată gama $0 < S_t < S'_t$: ($S'_t \cong 0,15$ în acest caz) legea de curgere de tipul (14) nu este, de fapt, aplicabilă. În această gamă de saturații, procesul de desaturare are loc în alte condiții (v. Cap. V, F. k.).

Se observă că raportul viscozităților celor două fluide nu influențează forma curbilor, cel puțin în cea mai mare parte a gamei de permeabilități relative. În gama permeabilităților foarte mici, se observă o oarecare împrăștiere a punctelor experimentale de-a lungul axei saturațiilor.

c. Influența gradientilor de presiune

Influența gradientilor de presiune asupra permeabilităților efective se manifestă, în general, printr-o sporire a acestora la creșterea primilor. Mai mult decît în cazul viscozităților, efectul lor este mai important și mai neregulat în gama permeabilităților mici (13) (ceea ce se explică prin efectul de « prag » al forțelor capilare și prin neomogenitatea granulometrică a nisipurilor).

Influența gradientilor de presiune aplicați, cum și a raportului viscozităților, se face mult mai simțită asupra procesului însuși de desaturare (v. Cap. V, F.k.1.m).

d. Efectul variației tensiunii interfaciale

Efectul variației tensiunii interfaciale în gama de saturație în care are loc curgerea efectivă bifazică (v. și f. j și k.), împreună cu efectul unghiului de contact, se manifestă: a) prin împie-

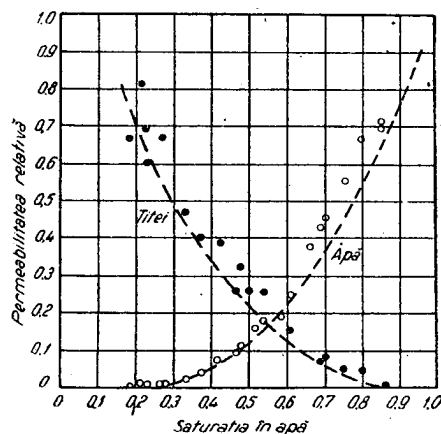


Fig. 31. Efectul tensiunii interfaciale asupra permeabilității efective (respectiv relative). Puncte izolate: valori pentru sistemul cu $\sigma = 5$ dyne/cm. Curbe întrerupte: valori pentru sistemul cu $\sigma = 30$ dyne/cm.

dicarea curgerii cît timp gradientii de presiune, respectiv presiunea de injecție, nu au atins valoarea presiunii de dezlocuire; b) prin deformarea curbilor k_t și $k_a = f(S_a)$. Pentru (a)

v. Cap. V F.k. și F.j.; pentru b), efectul este acela al unei reduceri a permeabilităților efective la creșterea tensiunii interfaciale, a se vedea fig. 31, în care sînt reprezentate curbele $k_{t,a} = f(S_a)$ pentru cazul a două sisteme apă-țitei cu tensiune interfacială $\sigma = 5$ dyne/cm, respectiv 30 dyne/cm.

Trebuie observat efectul de reducere a saturației ireductibile cu apă de la circa 0,30 la circa 0,18. Efectul reducerii presiunii de dezlocuire π nu reiese din fig. 31 decît indirect, prin reducerea saturației în țitei, la care începe curgerea bifazică.

Efectul variației structurii nisipului se manifestă, în general, prin aceea că, cu cît crește

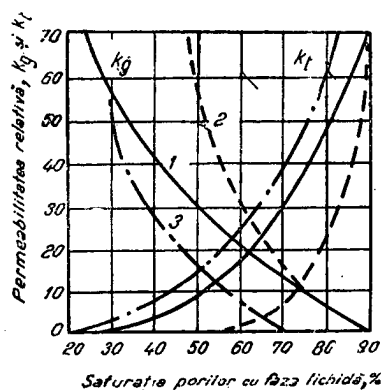


Fig. 32. Efectul cimentării nisipurilor asupra permeabilității efective, respectiv k_g și k_t :
1 — curbele de permeabilitate pentru un nisip necimentat;
2 — curbele de permeabilitate pentru gresie; 3 — curbele de permeabilitate pentru calcare.

finețea nisipului (ceea ce echivalează în parte și cu creșterea gradului său de cimentare) cu atît ambele curbe se deplasează către dreapta, către valori mai mari S_a pentru aceleași valori k_t și k_g (v. fig. 32).

O reducere a diametrului echivalent al elementelor rocii corespunde (pentru o aceeași saturație S_a) unei creșteri simțitoare a permeabilității relative față de țitei, respectiv unei scăderi oarecum mai puțin importantă a permeabilității relative față de apă.

e. Concluzii asupra permeabilității efective față de sistemele țitei-apă

Reprezentînd permeabilitățile față de fiecare fază ca valori relative, în funcție de saturație, se obțin curbe foarte puțin diferite de la rocă la rocă.

Factorii care influențează alura curbelor pot fi grupați într-un parametru unic, adimensional, α , definit ca:

$$\alpha = \frac{\pi}{d_e} \cdot \frac{1}{\frac{\Delta P}{\Delta L}}, \quad (16)$$

unde π este presiunea de dezlocuire, exprimată în cm col. Hg, caracteristică porilor maximi, tensiunii interfaciale și unghiului de contact;

d_e — diametrul echivalent al bobului de rocă, în cm;

$\frac{\Delta P}{\Delta L}$ — gradientul de presiune aplicat probei, exprimat în cm col. Hg/cm;

În practică, gama de variație posibilă este $0,05 < \alpha < 5,0$. Influența acestor factori asupra alurei curbelor de permeabilitate, în funcție de saturație, este reprezentată în fig. 33.

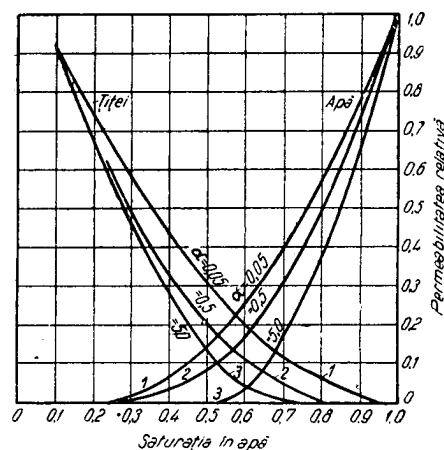


Fig. 33. Influența parametrului $\alpha = \frac{\pi}{d_e \text{ grad } P}$ asupra curbelor de permeabilitate relativă:
1 — $\alpha = 0,05$; 2 — $\alpha = 0,50$; 3 — $\alpha = 5,00$;

f. Permeabilitatea efectivă a rocilor față de sistemele gaze-lichid

Permeabilitatea efectivă a rocilor față de sistemele gaze-lichid este practic independentă de natura fluidelor respective și prezintă o variație asemănătoare aceleia față de sistemele apă și țitei. Deși diferențele de greutate specifică și tensiunile interfaciale sînt mai mari, zona de împrăștiere a curbelor este aproape aceeași. În cazul acestor sisteme se dispune de material experimental obținut prin procesele de tipurile (a), (b) și (c) (v. F.a.2.). Pentru procesul de tip (b), cu aparatură asemănătoare aceleia reprezentată în fig. 26, folosindu-se pentru studiu sistemul CO_2 + apă, îndeosebi pentru a se putea realiza în parte, prin procese de tip (c), saturații foarte scăzute cu gaz, se obțin rezultate de natura celor reprezentate în fig. 34, cu singura schimbare (pentru concluzii) că faza umezitoare este țiteiul (în locul apei), iar faza neumezitoare o constituie gazul (în locul țiteiului). Încercări efectuate, pentru comparație, efectiv cu aer + țitei în loc de

$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ au dat rezultate asemănătoare, (v. fig. 36).

Din cauza tensiunilor interfaciale, în medie mai mari și a influenței mai pronunțate a fenomenelor capilare, efectul gradientului de presiune este mai pronunțat, deși nu constant.

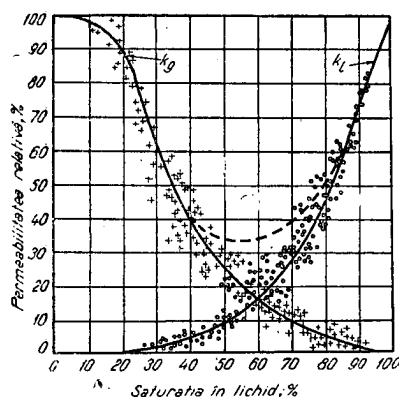


Fig. 34. Curbe de permeabilitate relativă față de gaz și de lichide (CO_2 și H_2O), obținute pe nisipuri necimentate sau slab cimentate, de diferite proveniențe (18—200 mD).

Observație. Experiențele redată în fig. 37 nu au fost efectuate prin procese de tipul (b) (v. F.a.2), ci printr-o variantă: desaturare de țitei prin injectare continuă de aer, proces apropiat în parte, de cel de tipul (a).

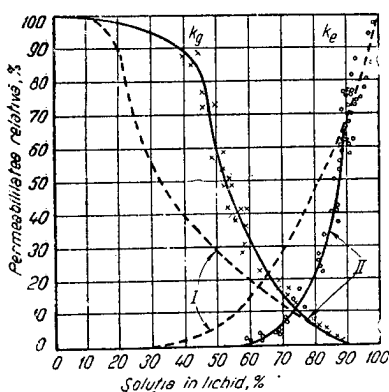


Fig. 35. Comparatie între curbele de permeabilitate relativă față de gaz și de lichide, între nisipuri necimentate și gresii:

I — nisipuri necimentate; II — gresii

g. Permeabilitatea efectivă a rocilor față de sistemele cu trei componenți imiscibili

Încercările experimentale efectuate atât în sisteme simplificate (azot, apă, lampant, ulei rafinat), cit și cu sisteme comparabile celor din zăcămint au dat rezultate echivalente, în limita erorilor de observație.

Rezultatele sînt, în general, mai puțin precise, deoarece, dacă în procesele de tipul (b) se pot determina relativ ușor debitele de fază, și, deci, permeabilitățile relative, determinarea saturațiilor pe cale electrică este posibilă numai pentru faza conductoare. Pentru deosebirea

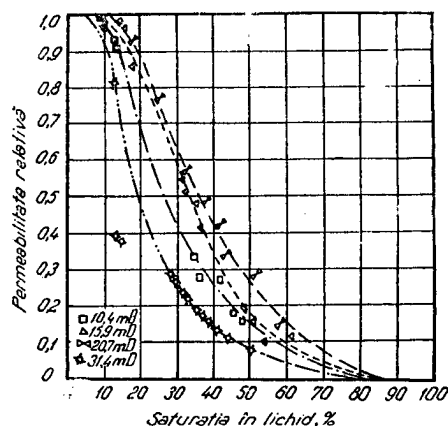


Fig. 36. Curbele de permeabilitate relativă față de aer în prezența țiteiului, pentru patru gresii silicioase.

între S_g și S_l se folosesc fie detenta și colectarea gazelor (procedeu lung și neprecis), fie, recent, contaminarea intenționată a fazei țitei cu un opacifiant pentru razele X și determinarea cantitativă a puterii de absorbție a probei față de aceste raze, prin etalonarea prealabilă, ceea ce permite dozarea cantității de opacifiant și, deci, a saturației în țitei S_l .

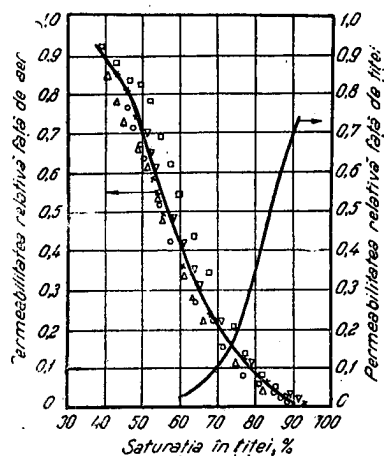


Fig. 37. Influența gradientului de presiune asupra curbei de permeabilitate relativă față de aer (carotă de gresie silicioasă, cu granulometrie remarcabil uniformă, 520 mD) obținută prin injectarea numai de aer.

Valorile gradientilor de presiune sînt de ordinul:

Δ — $0,65 \cdot 10^{-3}$ at/cm; \circ — $1,30 \cdot 10^{-3}$ at/cm;

∇ — $1,95 \cdot 10^{-3}$ at/cm; \square — $2,60 \cdot 10^{-3}$ at/cm.

1. Permeabilitatea față de apă. În limita preciziei realizabile prin determinarea rezistivimetrică a saturației în apă, S_a , se poate trage concluzia că permeabilitatea relativă față de apă depinde numai de S_a și este complet independentă de raportul S_g/S_t din

$$S_t + S_g = 1 - S_a, \quad (\text{v. fig. 38}),$$

care coincide practic cu cea reprezentată în fig. 34.

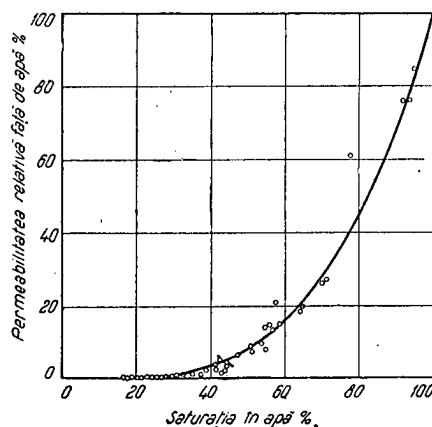


Fig. 38. Variația permeabilității relative față de apă, în funcție de saturația în apă S_a a unui nisip saturat cu amestec trifazic apă- CO_2 -lampant. Curba continuă se referă la sistemul apă- CO_2 .

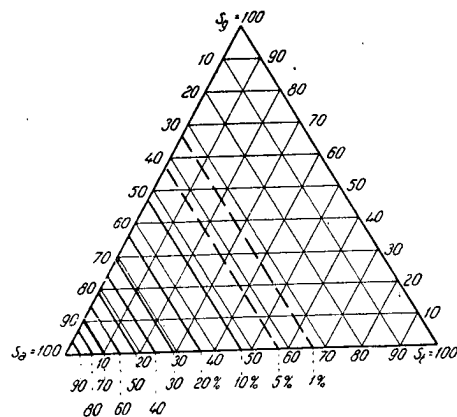


Fig. 39. Izopermele față de apă ale unui nisip necimentat, la curgerea trifazică: apă-țitei-gaz, în funcție de saturațiile în fluidele respective (reprezentate în diagrama clasică triunghiulară de compoziție; permeabilitățile relative sint exprimate în procente).

Reprezentind saturațiile S_g , S_t și S_a prin lungimea perpendicularei coborite din punctul reprezentativ de compoziție la latura opusă virfului de saturație totală respectivă, se obțin curbe de egală permeabilitate, izoperme, practic rectilinii (fig. 39).

2. Permeabilitatea față de țiței, dimpotrivă depinde nu numai de S_t , ci și de valorile S_g și S_a , și anume, pentru o aceeași saturație în țiței, deci, pentru o aceeași sumă a saturațiilor în gaze și în apă, permeabilitatea relativă față de țiței prezintă un maxim în regiunea $S_g \approx S_a$, în cazul saturațiilor mari în țiței. În cazul saturațiilor mici în țiței, izopermele își micșorează curbura, iar maximumul se deplasează către zona saturațiilor mari în apă (v. fig. 40).

Asimetria pronunțată a izopermelor față de țiței în raport cu mediana $S_a = S_g = 50\%$

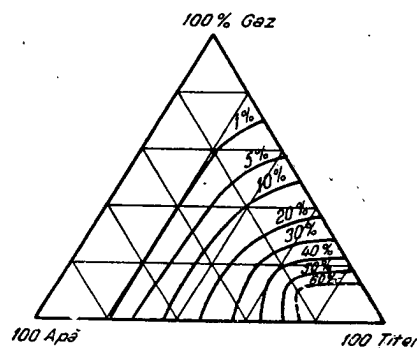


Fig. 40. Izopermele față de țiței ale unui nisip necimentat la curgerea trifazică apă-țitei-gaze.

se datorește comportării de umezire a rocei, totale diferită, de către fazele respective.

3. Permeabilitatea față de gaz, în funcție de saturațiile în apă și în țiței, are o compor-

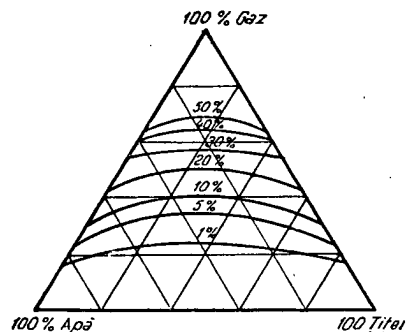


Fig. 41. Izopermele față de gaze ale unui nisip necimentat, în curgerea trifazică apă-țitei-gaze.

tare intermediară între aceea față de apă și aceea față de țiței. Ea variază mai puțin decât aceea față de țiței, cu raportul dintre saturațiile celorlalte două faze, și este aproximativ independentă de natura fazei străine predominante: k_g are sensibil aceeași valoare pentru aceeași valoare a raportului fazelor străine, c, fie că $c = \frac{S_a}{S_t}$, fie că $c = \frac{S_t}{S_a}$, ceea ce se

explică prin faptul că ambele faze străine udă mai bine roca decât faza proprie (gazul), iar curbele sînt practic simetrice față de mediana $S_a = S_t = 50\%$ (v. fig. 41).

Independența permeabilităților relative de viscozitate, la curgerea trifazică, a fost verificată experimental, dar dependența lor de structura roci și de gradientii de presiune este încă puțin cunoscută.

h. Concluzii asupra permeabilităților relative

În domeniile respective de saturație, în care permeabilitatea are semnificația analitică definită prin ecuațiile (14) și (15), permeabilitatea relativă față de faze umezitoare scade la început foarte repede de la valoarea unitate, cînd saturația în fază proprie scade de la aceeași valoare. Scăderea are loc după o lege de forma:

$$k_u = \left(\frac{S_u - S'_u}{1 - S'_u} \right)^n \quad (17)$$

în care:

- k_u este permeabilitatea relativă față de faza umezitoare, fracțiune subunitară;
- S_u — saturația în faza umezitoare, fracțiune subunitară;
- S'_u — saturația ireductibilă în faza umezitoare, fracțiune subunitară;
- n — un exponent cu o valoare apropiată de 3 (valoare propusă pentru calcule curente).

Legea este practic aplicabilă atît în cazul sistemelor apă-țiței, pentru permeabilitatea față de apă, cît și în cazul sistemelor țiței-gaze, pentru permeabilitatea față de țiței.

Pentru permeabilitatea față de faza neumezitoare, luată, în general, sub forma raportului dintre permeabilitatea efectivă și permeabilitatea din cazul roci saturate la limita superioară de saturație, realizabilă pe cale de saturare progresivă, k_n , se poate da o lege analogă:

$$k_n = \left(\frac{S_n - S'_n}{1 - S'_n - S'_u} \right)^m, \quad (18)$$

în care:

- k_n este permeabilitatea relativă față de faza neumezitoare, fracțiune subunitară;
- S_n — saturația efectivă în fază neumezitoare, fracțiune subunitară;
- S'_u — saturația ireductibilă în fază umezitoare, fracțiune subunitară;
- m — un exponent cu o valoare apropiată de 2 (valoare propusă pentru calcule curente).

În cazul sistemelor apă-țiței, formulele (17) și (18) sînt folosite sub forma:

$$k_a = \left(\frac{S_a - S'_a}{1 - S'_a} \right)^3 \quad (19)$$

și

$$k_t = \left(\frac{1 - S'_t - S'_a}{1 - S'_t - S'_a} \right)^2 \quad (20)$$

în care indicii a și t se referă la apă, respectiv la țiței și ('), la saturațiile ireductibile.

În cazul sistemelor gaze-țiței, în care totuși apa este prezentă sub formă de apă asociată, S'_a permeabilitățile relative sînt:

$$k_t = \left(\frac{S_t}{1 - S'_a} \right)^3 \quad (21a)$$

și

$$k_g = \left(\frac{1 - S'_t - S'_a - S'_t}{1 - S'_t - S'_a} \right)^2 \quad (21b)$$

Limitările de aplicabilitate în ce privește domeniul de saturație în faza proprie se datoresc particularităților fizice și geometrice ale rocii; ele exclud gamele de saturație în care curgerea nu are loc, datorită blocării parțiale a uneia sau a unora dintre faze. Blocarea se produce, în cazul fazelor umezitoare, prin adsorbție și adeziune capilară, iar în cazul celor neumezitoare, prin captarea de bule în pori din care nu pot fi expulzate din cauza insuficienței gradientilor locali de presiune realizabili, în comparație cu cei necesari deplasării bulelor (v. Cap. V.F.k.).

Afară de cauzele menționate (structură, gradienti de presiune, tensiuni interfaciale), curbele $k = f(S)$ date mai sînt condiționate și de alura procesului de desaturare (de tip a, b, sau c) (ref. F.a.2.). În cazul rocilor slab cimentate și cu permeabilitatea absolută mare, dependența este relativ redusă (v. fig. 42), dar în cazul rocilor deosebit de compacte, diferențele pot fi apreciable îndeosebi între cazul (b) și (c) (v. fig. 43) în care este reprezentat un exemplu extrem al unei gresii cu permeabilitate inferioară limitei economice. În ambele cazuri se observă diferențele dintre permeabilitățile absolute determinate cu gaz, pe de o parte, și cele determinate cu lichide, pe de altă parte. Diferențele se datoresc efectului de alunecare prezent în cazul gazelor și care are o valoare relativă mai mare, în cazul rocilor compacte. v. Cap. VI.

Diferența esențială se datorește faptului că pentru o aceeași valoare a saturației cu gaze libere, în cazul procesului de tip (c) (ref. F.a.2) (desaturare prin ieșirea gazelor din soluție), gazele sînt mult mai uniform distribuite decât în celelalte două cazuri în care bulele de gaze libere se găsesc practic numai în canalele mari, a căror obstruare reduce masiv permeabilitatea

față de lichide. Distribuția fazelor umezitoare, respectiv a fazelor neumezitoare, este de asemenea oarecum diferită în cazul (a) față de cazul (b). În cazul (a), desaturarea se efectuează

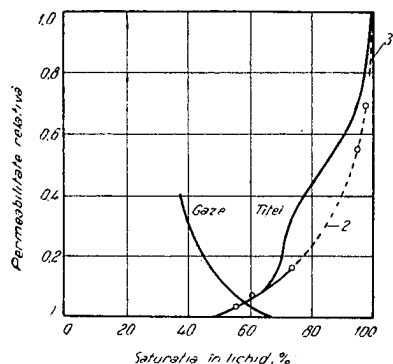


Fig. 42. Comparatie între curbele de permeabilitate relativă, ridicate experimental prin procedee de desaturare de tip a, b și c, (ref. F.a.2.) în cazul unei roci cu permeabilitate relativ mare;

1 — curbe de permeabilitate relativă ridicate prin desaturare sub diferența de presiuni capilare constante (a); 2 — curbe de permeabilitate relativă, ridicate prin desaturare sub debite constante de fază (b); 3 — curbe de permeabilitate relativă, ridicate prin desaturare sub degajarea gazelor din soluție (c); $k_{abs} = 520$ mD, determinată cu aer: 453 mD, cu Țitei, respectiv 459 mD, cu apă.

cu oarecare tendință a fazei neumezitoare de a lucra ca un piston relativ localizat, pe când, în cazul (b), ambele faze își creează în oarecare măsură canale de curgere independente, proprii.

De aceea, în tratarea problemelor de zăcămint reale, se recomandă alegerea curbelor de

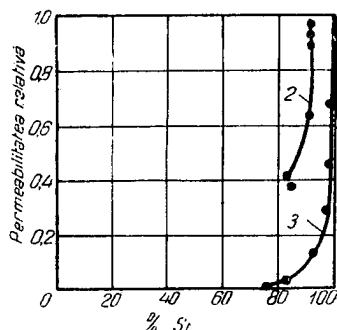


Fig. 43. Comparatie între curbele de permeabilitate relativă, ridicate experimental prin procese de desaturare de tip b și c, în cazul unei gresii compacte.

$k_{abs} = 3,5$ mD determinată cu gaze, respectiv 2,1 mD, cu Țitei; 2 — curba de permeabilitate relativă, ridicată prin desaturare, sub debite constante de fază (b); 3 — curba de permeabilitate relativă, ridicată prin desaturare sub degajarea gazelor din soluție (c).

$k = f(S)$, corespunzătoare tipului de proces de desaturare cel mai apropiat de cel real din faza respectivă de exploatare a zăcămintului (v. Cap. V, G. și I.).

i. Interpretarea fizică a curbelor de permeabilitate relativă în funcție de saturație

Faptul că, în general, roca prezintă o permeabilitate relativă față de faza neumezitoare practic egală cu unitatea, înainte de a atinge saturația totală (și anume la 0,8—0,9), demonstrează că, chiar în cazul saturației totale, nu toată cantitatea de fluid saturant participă la procesul de curgere, ci o parte, sensibil egală cu cea corespunzătoare saturației ireducibile, rămâne legată de rocă prin procese de adsorbție și prin fixare superficială.

Este de asemenea evident că, din cauza dimensiunilor finite ale probelor cercetate experimental, în domeniul de saturație cu fază neumezitoare, în care nu se recoltează efluent din această fază, o curgere a acestei faze are totuși loc în interiorul carotei, astfel încât saturația în faza neumezitoare, la care începe curgerea acesteia, este determinată experimental în mod eronat și anume la o valoare prea mare.

Eroarea este cu atât mai mare, cu cât proba are dimensiuni mai mari și, în oarecare măsură, proba este efectuată cu o viteză mai mare.

Blocarea bulelor de fază neumezitoare în porii cu dimensiuni mai mici, determinând impermeabilitatea aparentă a roci față de faza neumezitoare, este explicată de obicei schematic, pe baza efectului Jamin. Acesta, sub forma lui pură, constă în apariția unei rezistențe suplimentare la curgerea unei bule de fază neumezitoare într-un canal cilindric, al cărui volum este completat cu fază umezitoare. Rezistența la curgere are valoarea unei diferențe de presiune-prag, care se adaugă, încă din starea de repaus, rezistențelor care se opun apoi dinamic curgerii.

j. Presiune capilară, unghi de contact

În cazul unui canal cu secțiune circulară, rezistența întâlnită de fețele bulei are valoarea $\Delta P_1 + \Delta P_2$, unde ΔP_1 este diferența de presiune dintre faze, datorită forțelor superficiale din suprafața din avalul curgerii, respectiv ΔP_2 la suprafața din amont. Dacă raza canalului este variabilă, $\Delta P_1 \neq \Delta P_2$ și anume:

$$\Delta P_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{2\sigma}{R_1} \quad (22)$$

respectiv $\Delta P_2 = \frac{2\sigma}{R_2}$,

unde:

R_1 este raza de curbură medie a feței din aval a bulei (v. fig. 44), în cm;

R_2 — raza de curbură medie a feței din amont a bulei, în cm;

σ — tensiunea interfacială dintre fazele în contact, în dyne/cm;

ΔP — diferența de presiune, înainte și după bulă, în dyne/cm².

Din cauză că forțele superficiale exercită o presiune capilară asupra mediului în care este situat centrul de curbură al suprafeței de separație, ΔP_1 și ΔP_2 au sensuri opuse, iar diferența dintre presiunile din faza umezitoare în puncte situate imediat înainte și după bulă este:

$$\Delta P = 2\sigma \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (23)$$

Razele de curbură ale menișcurilor neputând fi măsurate practic, se înlocuiesc ecuațiile (22) prin (24):

$$\Delta P_1 = 2 \frac{\sigma \cos \theta_1}{r_1} \text{ și } \Delta P_2 = 2 \frac{\sigma \cos \theta_2}{r_2}, \quad (24)$$

în care:

r_1 și r_2 sînt razele canalului în dreptul suprafețelor respective;
 θ_1 și θ_2 — unghiurile de contact, între generatoarea canalului și tangenta în planul meridian la menisc, în punctul de contact al acestuia cu peretele canalului.

În acestea, r_1 și r_2 sînt măsurabile, iar θ poate fi determinat experimental prin măsurarea directă sau indirectă cu ajutorul energiei de adeziune. Valoarea sa de echilibru este dată de următoarea relație:

$$\theta = \arccos \frac{A_{u-r} - A_{n-r}}{\sigma_{u-n}}, \quad (25)$$

în care:

A_{u-r} este tensiunea de adeziune a fazei umezitoare față de materialul peretelui canalului, în dyne/cm;
 A_{n-r} — idem a fazei neumezitoare, în dyne/cm;
 σ_{u-n} — tensiunea interfacială a celor două faze, în dyne/cm.

$A = W - \sigma$, unde W este energia de adeziune a fazei corespunzătoare indicelui, la materialul peretelui canalului, în ergi/cm², iar;

σ — tensiunea superficială proprie a fazei respective.

Energiile de adeziune se pot determina experimental prin determinarea izotermelor de adsorbție a fazei respective la suprafața unei pulberi fine din materialul peretelui canalului. În realitate, metoda este dificilă și are numai o valoare de control, deoarece valorile tensiunilor de adeziune sînt foarte mult influențate de starea suprafeței peretelui, de contactul lui anterior («istoria» sa din punctul de vedere al adsorbției) și de prezența în fazele fluide a unor impurități adsorbabile. De exemplu în cazul n-heptan-apă, $A_{u-n} \sim 315$ dyne/cm

(apă față de cuarț), $A_{n-r} \sim 59$ dyne/cm (n-heptan față de cuarț), ceea ce conduce la $\cos \theta > 1$. În realitate, fazele prezente au totdeauna o solubilitate reciprocă limitată iar fazele astfel impurificate prezintă valori mult mai mici pentru A . De aceea se preferă, determinarea experimentală directă a unghiului de contact de echilibru prin metoda picăturii: pe o fațetă a unui cristal din materialul solid de cercetat (practic cuarț, feldspati, calcit), de puritate verificată, se așează o picătură de fază neumezitoare și se introduce într-o cuvă cu pereți transparenți, în faza umezitoare (v. fig. 44). Deși principial, picătura poate fi

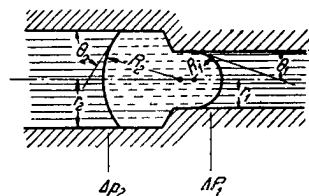


Fig. 44. Schema formării diferențelor de presiune prin acțiunea forțelor capilare, la limitele unei bule de fază neumezitoare, într-un canal de secțiune circulară variabilă, plin cu faza umezitoare.

și de fază umezitoare, introdusă în faza neumezitoare, de obicei nu se procedează astfel din cauza opacității fazei neumezitoare (țiței). Varianta este, însă, utilizabilă pentru cazul gaz-țiței-mineral din roca colectoare. În cazul țței-apă, cristalul (reprezentat în fig. 45 printr-o

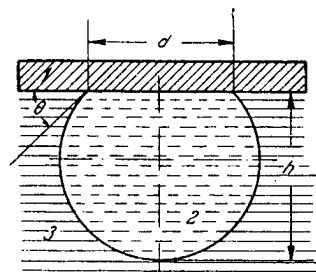


Fig. 45. Determinarea unghiului de contact θ , prin metoda picăturii, cazul apă-țiței:
 1 — placă reprezentînd un cristal de material solid;
 2 — țței; 3 — apă.

placă) trebuie introdus cu fața cu picătura în jos, pentru a se evita desprinderea ei din cauza diferenței de densitate. Cu ajutorul unui microscop cu reticul se determină înălțimea h a picăturii și diametrul d al cercului de contact, obținîndu-se:

$$\theta = 2 \arctg \frac{2h}{d}. \quad (26)$$

Determinarea prin metoda clasică, a ascensiunii capilare, este mai puțin precisă, deoarece starea de puritate a suprafeței interioare a

tubului capilar este greu realizabilă și controlabilă și necesită cunoașterea tensiunii interfaciale, determinată experimental cu tensiometrul de torsiune și cu placa de sticlă sau cu inel de Pt.

Valoarea «de echilibru» a unghiului de contact depinde de factorii menționați și, în special, de natura fluidului care a fost în atingere cu zona actuală de contact al meniscului cu suprafața materialului solid (mineral, perelele canalului). Deoarece cazul cel mai frecvent studiat este acela al sistemului țiței-apă, unghiul de contact θ se măsoară între tangentă și fața solidului în contact cu apa. Cazul general, $\cos \theta > 0$, corespunde unei tensiuni de adeziune față de solid mai mare la apă decât la țiței. Experiența arată că, dacă zona de contact a meniscului cu suprafața solidului a fost în prealabil o zonă de contact apă-solid, $\cos \theta$ este totdeauna pozitiv (θ ascuțit). Dacă zona respectivă a fost în prealabil o zonă de con-

Între cele două poziții-limită ale tangentei, valoarea unghiului θ este determinată de diferențele de presiuni efective dintre faze, cauzate de factorii externi.

Cazul cel mai răspândit, între apă și țiței, în rocele de zăcămint, pare a fi cel reprezentat în fig. 46 a, cînd, indiferent de natura fluidului de contact anterior, apa tinde să dezlocuiască țițeiul. Cazul reprezentat în fig. 46 c, cînd țițeiul ar tinde să dezlocuiască apa, este practic inexistent.

În cazul canalelor cilindrice circulare (roca ideală, v. Cap. II B.a.1.), diferența de presiune (24) devine:

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = 2\sigma \frac{\cos \theta_1 - \cos \theta_2}{r} \quad (26)$$

În cazul canalelor de pori, reprezentate schematic în fig. 44, diferența de presiune necesară deplasării unei bule este:

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = 2\sigma \left(\frac{\cos \theta_1}{r_1} - \frac{\cos \theta_2}{r_2} \right) \quad (27)$$

iar în cazul rocilor reale, la care perelele canalului nu are o direcție paralelă cu axa canalului (direcție de deplasare a bulei), nu se mai poate face apel la raza canalului, deoarece ar fi necesar ca în relația (27) să se introducă, în loc de r_1 și r_2 , razele zonelor de contact al meniscului cu roca (și canalul real de pori nu este nici circular, cel puțin), iar în loc de θ_1 și θ_2 , nu unghiurile de contact, ci unghiurile făcute de tangentă la menisc în planul figurii cu direcția de deplasare a bulei, unghiuri care sînt imposibil de determinat și foarte variabile. De altfel, din cauza neomogenității granulometrice a rocei, determinarea exactă locală nu prezintă interes, comportarea rocei fiind determinată statistic de comportarea tuturor canalelor sale de pori.

Determinarea diferenței de presiune dintre faze sub forma (23) prezintă totuși avantajul de a reprezenta diferența de presiune efectivă dintre cele două faze în contact, în cele mai variate condiții de saturație. De exemplu, în cazul reducerii progresive a saturației cu fază umezitoare, cînd aceasta rămîne în starea de distribuție pendulară (v. Cap. V. D. a și b) ca în fig. 47, între presiunea din faza umezitoare și din faza neumezitoare, forțele superficiale produc o diferență calculabilă după relația (22) ca:

$$\Delta P_c = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (28)$$

unde

P_c este diferența de presiune produsă de forțele capilare între faze;

R_1 — raza de curbă minimă a suprafeței toroide din fig. 47, convențional $R_1 > 0$;

R_2 — raza de curbă maximă a suprafeței toroide din fig. 47, convențional $R_2 < 0$.

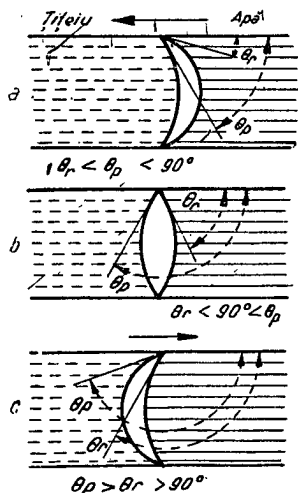


Fig. 46. Influența naturii fluidului de contact anterior, respectiv a direcției de deplasare a meniscului asupra unghiului de contact:

- a — cazul $\theta_r < \theta_p < 90^\circ$ apa tinde să dezlocuiască țițeiul;
- b — cazul $\theta_r < 90^\circ < \theta_p$ meniscul nu se poate deplasa decât sub acțiunea forțelor exterioare;
- c — cazul $90^\circ < \theta_r < \theta_p$ sub acțiunea forțelor exterioare; țițeiul tinde să dezlocuiască apa.

tact țiței-solid, θ este fie drept sau obtuz, fie ascuțit, dar mai mare decât în cazul udării prealabile cu apă. În primul caz, unghiul θ se numește unghi de contact regresiv, în al doilea caz, unghi de contact progresiv, după direcția de deplasare a apei față de poziția trecută a meniscului (v. fig. 46)*).

* Trebuie observat că variația lui θ se produce chiar dacă meniscul nu s-a deplasat efectiv, ci s-a deformat numai, sub acțiunea unei diferențe de presiune exterioare care ar tinde să-l deplaseze.

Observație. Razele R_1 și R_2 se măsoară după direcția unei tangente comune la sferele în contact, trecând prin punctul de contact, și au valori algebrice de semn contrar.

Pe măsură ce procesul de desaturare în faza umezitoare progresa, cantitatea de lichid

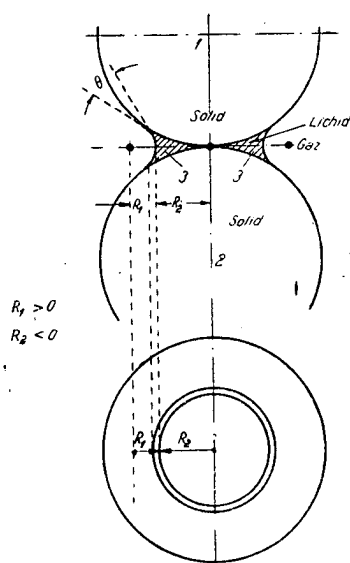


Fig. 47. Schema suprafeței de separație la distribuția pendulară a fazei umezitoare: 1 și 2 — grăunți sferici ai rocei fictive; 3 — inel de saturație pendulară.

cuprinsă în zona de contact scade, R_1 scade mult mai repede decât R_2 , astfel încât diferența de presiune între faze crește.

k. Presiunea capilară în rocele colectoare

Experiența a dovedit că pentru orice rocă colectoare cu structură granulară (exceptând, deci, rocele poroase prin fisurare) există o valoare a saturației, *saturația ireductibilă*, sub care saturația în faza umezitoare (caz analog celui reprezentat în fig. 47) sau în cea neumezitoare (cazul din fig. 48, analog celui din fig. 44) nu poate fi redusă, oricât de mare ar fi diferența de presiune care se realizează între faze. Explicația constă în aceea că diferența de presiune efectiv realizabilă între faze este limitată de posibilitățile practice. Atât în cazul reprezentat în fig. 47, cât și în cazul fig. 48 (în care se produce, în parte, efectul Jamin) nu se pot realiza diferențe mari de presiune, deoarece faza continuă se poate strecura printre obstacolele constituite de granulele rocei și de suprafețele capilare, pe cînd faza discontinuă nu, astfel încît gradientii efectivi de presiune în probă sînt limitați.

Realizarea efectivă a diferenței de presiune dintre faze și măsurarea ei prezintă numeroase dificultăți practice; de aceea aparatura de măsurat încercată are un caracter variat.

La toate metodele se realizează asupra probei o presiune uniformă mai mare, iar asupra fazei umezitoare din probă, o presiune mai mică. După atingerea stării de echilibru între diferența de presiuni aplicate și cele generate,

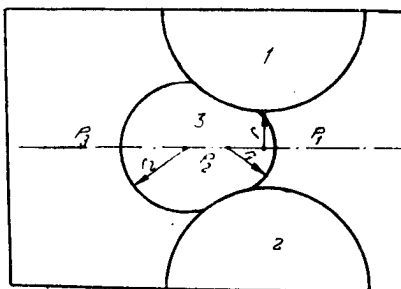


Fig. 48. Schema suprafeței de separație la distribuția funiculară a fazei umezitoare. Bula de fază neumezitoare constrinsă să intre în porțiunile de secțiune minimă ale canalelor de pori. 1 și 2 — grăunți sferici ai rocei fictive; 3 — bula de fază neumezitoare; P_1 , P_2 , P_3 — presiunea în amont de bulă și în aval de bulă.

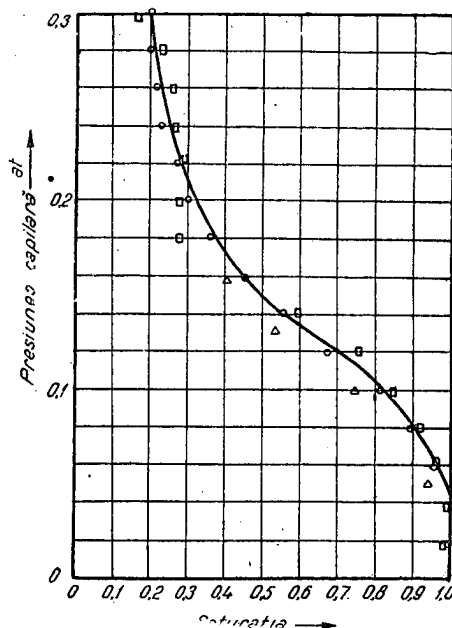


Fig. 49. Curba de variație a saturației în fază umezitoare (apă), în funcție de diferența dintre presiunea, aplicată fazei neumezitoare (aer) și cea aplicată fazei umezitoare: Δ — prin metoda statică (presiuni exterioare); □ și 0 — prin metoda dinamică (centrifugă).

în funcție de saturație (v. concluzia la ecuația 28), se notează cuplul de valori de echilibru ΔP_c și S_u . Determinându-se aceste valori pentru diferite presiuni aplicate, se obține curba presiune capilară-saturație, care este reprezentată în fig. 49-52.

Caracteristicile diagramei sînt: presiune de dezlocuire (v. F.b.) care în cazul reprezentat în fig. 49, are valoarea $\sim 0,048$ at, necesară începutului desaturării, caracteristică îndeosebi pentru secțiunile maxime ale canalelor de pori de rocă și saturația ireductibilă în apă, limită de saturație către care tinde asimptotic curba cînd presiunea aplicată tinde către infinit. În cazul prezentat în fig. 49, din cauza limitării de scară, caracterul asimptotic este mai puțin vizibil decît în fig. 50, 51 și 52. Din cauza pantei extrem de mari a curbei de desaturate în zona saturației ireductibile, s-a propus, cu succes, determinarea saturației cu apă aso-

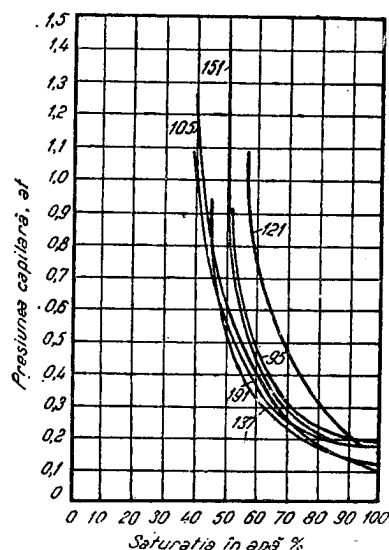


Fig. 50. Curbe de presiune capilară-saturație în apă obținute experimental asupra unor gresii relativ eterogene din punct de vedere granulometric. Cifrele indicatoare ale curbelor reprezintă permeabilitatea rocii respective în mD.

ciată a rocilor din zona petroliferă, ca fiind egală cu cea ireductibilă, obținută la desaturare în apă cu ajutorul aerului. Experiențele de control, cu determinarea în paralel a saturației în apă asociată, prin distilare (v. Cap. III B.b.4.b) 1)), au dovedit o bună concordanță a celor două saturații.

Pe măsură ce presiunea aplicată este mai mare, faza neumezitoare pătrunde progresiv în canalele de pori cu secțiuni din ce în ce mai mici, iar variația saturației rămase, în funcție de presiunea aplicată, reprezintă variația conținutului fracțional cumulativ de pori în funcție de dimensiunea în scădere a secțiunii de trecere a canalelor de pori.

O pantă mai mare a curbei, $\left(\frac{\partial P_c}{\partial S_u}\right)$, reprezintă, deci, o variație mai pronunțată a dimensiunii canalele și, deci, o eterogenitate granulometrică mai mare a rocii. Dimpotrivă, pre-

zența unui palier al curbei denotă omogenitatea granulometrică a rocii.

În fig. 50 se observă curbe de presiune capilară pentru roce relativ neomogene, iar în fig. 51, curbe pentru roce relativ omogene.

Reproductibilitatea acestor curbe este remarcabilă, cu condiția de a se lucra în condiții comparabile. Dacă, însă, după ce s-a ajuns cu reducerea saturației în faza umezitoare la 40% (punctul 1, fig. 52), se încetează exercitarea presiunii exterioare care provoacă diferența de presiune dintre faze, aceasta scade pînă la zero, în timp ce saturația în lichidul umezitor crește. Se observă, însă, (fig. 52, ramura infe-

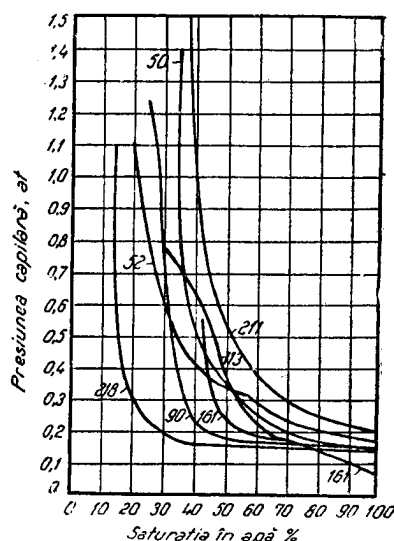


Fig. 51. Curbe de presiune capilară-saturație în apă obținute experimental asupra unor gresii relativ omogene din punct de vedere granulometric. Cifrele indicatoare ale curbelor reprezintă permeabilitatea rocii respective în mD.

rioară punctată) că saturația nu mai revine la valoarea inițială, ci rămîne în mod constant inferioară valorii prezentate pentru aceeași diferență de presiune, la creșterea acesteia. Acest fenomen se datorește în cea mai mare parte variației unghiului de contact θ între limitele $\theta_p - \theta$; curba închide între cele două ramuri extreme ale sale, saturare-desaturare o «bucă de histeresis» (v. și fig. 53). Punctele din interiorul acestei bucle reprezintă situații posibile de saturație-presiune capilară în diferite condiții inițiale de lucru. Dacă, după anularea diferenței de presiune dintre faze și după revenirea saturației la, de exemplu 80% (fig. 52, punctul 2), se aplică din nou diferența de presiune dintre faze, se observă amorsarea din nou a procesului de desaturare tot la o presiune finită (presiunea-limită sau presiunea-prag), analogă presiunii de dezlocuire din cazul inițial (saturarea pornind de la 100% faza umezitoare), însă inferioară acesteia și varia-

bilă cu poziția punctului 2 de reamorsare a procesului de desaturare.

În fig. 52 este reprezentată prin punct-linie-punct variația presiunii-prag, în funcție de saturația de reamorsare.

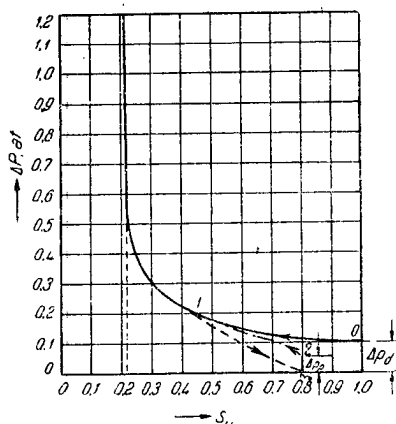


Fig. 52. Reprezentarea apariției fenomenului de histererezis capilar:

Linia plină — curba de saturare; linia punctată — curba de resaturare parțială; punct-linie-punct — curba de redsaturare, cazul particular al reamorsării din punctul $S_u = 0,80$; 1 — punct de întrerupere a desaturării; 2 — saturație maximă atinsă prin resaturare; Δp_d — presiunea de dezlocuire; Δp_p — presiunea-prag.

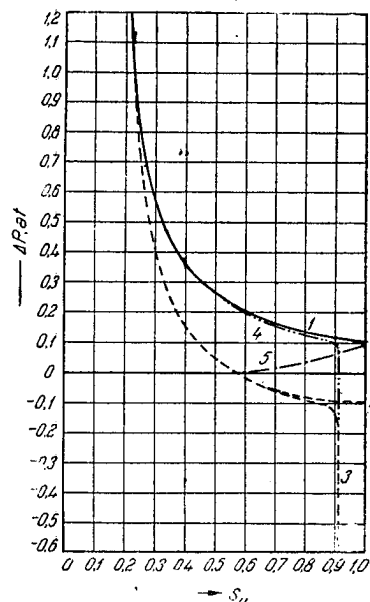


Fig. 53. Ramurile extreme ale buclei de histererezis capilar și variația presiunii-prag cu saturația de reamorsare: 1 — ramura de desaturare pornind de la saturația totală în faza umezitoare; 2 — ramura ipotetică de resaturare; 3 — ramura reală de resaturare; 4 — ramura reală de redsaturare; 5 — curba de variație a presiunii-prag, în funcție de saturația de reamorsare.

Oricît de mari ar fi presiunile negative puse în joc pentru resaturare, nu se poate obține o resaturare totală cu lichid (procesul de desaturare-resaturare nu este reversibil), deoarece o parte din faza neumezitoare rămîne blocată în pori, astfel încît curba 2 fig. 53 are o existență pur ipotetică, curba reală de resaturare fiind ramura 3, fig. 53, care, ca și ramura 1, fig. 53 față de $S_u = 1$, nu mai atinge nici ea saturația $S_u = 1, 0$, chiar pentru presiuni negative foarte mari aplicate probei.

Dacă se aplică din nou diferențe de presiune pozitive pentru o nouă desaturare, procesul decurge după ramura de curbă 4, astfel încît ciclul de histererezis pur al procesului este definit prin ramurile 3 și 4. Ramura 1 nu mai poate fi atinsă prin simplă aplicare a unei diferențe de presiune între faze, ci numai după resaturarea completă prin procedee speciale (aplicare de vid). Ea este posibilă deoarece echilibrul în care se găsesc bulele de fază neumezitoare ocluse (ramura 3) este metastabil din punct de vedere mecanic și instabil din punct de vedere termodinamic. Ele pot fi îndepărtate, de exemplu, și prin procese de trecere în soluție printr-o spălare continuă în circuit deschis, cu fază umezitoare.

Curbele de saturare-desaturare din fig. 49—53 pot fi trasate și luînd în ordonată curbura medie a suprafeței de separație dintre faze, în locul presiunii capilare, dacă se cunoaște σ și θ . Procedeu este folosit rar, din cauza necunoașterii exacte a lui θ , cuprins între θ_p și θ_r .

1. Utilizarea curbelor de saturație-presiune capilară

Curbele de saturare, caracteristice rocei și sistemului de faze umezitoare, respectiv de faze neumezitoare, sînt folosite: 1) pentru determinarea saturației în apă asociată; 2) pentru cunoașterea presiunilor de dezlocuire și a celor «prag»; 3) pentru studiul general al caracteristicilor rocei.

Valoarea lor ca metodă de determinare a saturației în apă asociată este deosebită. Compararea cu metodele clasice folosite în același scop, determinarea prin distilare cu retorta la 200 °C (Cap. III B. b. 4, b) 1)), asupra unor carote extrase prin carotaj cu noroi anhidru și determinarea indirectă prin dozarea salinității carotei și compararea cu salinitatea apei de zăcămint asupra unor carote extrase în aceleași condiții de necontaminare cu apă dulce, a dat rezultatele din tabela 1.

Compararea cu valorile saturației în apă deduse prin metoda rezistivității electrice (Cap. III, B. b. 4. a) 3)), dă rezultate, în general, mai puțin concordante, nepotrivirea datorîndu-se în special imperfecției acestora.

Tabela 1. Compararea rezultatelor de determinare a conținutului de apă asociată prin diferite metode față de cele obținute prin metoda presiunii capilare

Proba	k	m	Distanța deasupra zonei acvifere,	Presiunea capilară	Saturația cu apă asociată			Diferența (3)-(2)
					(1) prin distilare	(2) prin salinitate	(3) prin presiune capilară	
nr.	Darey	%	m	at	%	%	%	%
1	20	17,0	26	4,0	89	71	74	- 3
2	312	29,3	25	3,8	28	23	23	0
3	382	22,3	23	3,6	52	37	37	0
4	518	28,1	22	3,4	29	34	33	- 1
5	250	23,0	20	3,2	53	36	38	+ 2
6	63	16,0	18	2,8	73	61	61	0
7	2556	27,2	17	2,65	36	28	28	0
8	23	20,0	16	2,52	82	59	59	0
9	319	25,7	14	2,25	44	32	27	- 5
10	1830	31,1	13	2,11	19	20	19	- 1
11	550	27,1	12,6	1,97	47	44	40	- 4
12	1490	27,2	11,5	1,84	44	38	38	0
13	1118	31,0	11	1,76	30	25	24	- 1
14	1730	32,6	10,6	1,70	27	23	24	+ 1
15	540	27,9	10,3	1,63	35	29	27	- 2
16	1048	28,6	10	1,63	36	34	25	- 9
17	410	27,5	9,7	1,56	38	37	35	- 2
18	1960	27,4	9,5	1,56	33	34	34	0
19	2238	29,8	8	1,36	36	34	26	- 8
20	1120	30,0	7	1,29	32	28	30	+ 2

Observație. Superioritatea aproape constantă a cifrelor din coloanele (1) față de (2) și (3) se explică prin dozarea pe această cale și a apei asociate chimie (așa numita apă de cristalizare).

m. Procedeele experimentale și aparatura folosită pentru ridicarea curbilor de desaturare

Ridicarea curbei $S_a = f(\Delta P_{capilar})$ se poate face prin metode statice, — aplicare de presiuni exterioare diferitelor faze, sau prin metode dinamice, — aplicare de presiuni interioare, generate de forțe de inerție.

1. Metodele statice cuprind două variante: a) cu presiuni superioare celei atmosferice și b) cu presiuni inferioare celei atmosferice.

În cazul presiunilor superioare celei atmosferice, acestea sînt aplicate cu aer pe suprafața exterioară a carotei, în prealabil saturată total cu apă prin introduceri repetate în apă și în vid și închisă într-un recipient de presiune (1, fig. 54). Una dintre fețele carotei 3, prelucrată prin abraziune cit mai plan, este aplicată în contact umezit cu o membrană semipermeabilă 2, (permeabilă în stare umedă față de apă, dar impermeabilă în stare umedă față de aer, cel puțin în limita presiunilor de lucru).

Dacă contactul capilar este corect asigurat prin membrană, apa din carotă se găsește la presiune atmosferică cit timp nu există o curgere de apă care să determine gradienti sensibili de presiune în faza-apă.

Dacă se aplică în 1 o presiune mai mare decît presiunea de dezlocuire, se produce la

început o expulzare de apă din carotă pînă ce, saturația scăzînd și presiunea capilară crescînd, aceasta ajunge să echilibreze presiunea aplicată. În practică, acest echilibru este atins foarte încet, (după cîteva ore sau chiar după cîteva zile, în funcție de sporul de presiune aplicat și de saturația rămasă). Pe măsură ce presiunea capilară opusă de suprafețele apă-aer se apropie, prin reducerea saturației, de presiunea aplicată, diferența dintre presiunea aplicată și cea generală în rocă scade și odată cu aceasta scade și debitul de desaturare, astfel încît viteza cu care sistemul se apropie de starea de

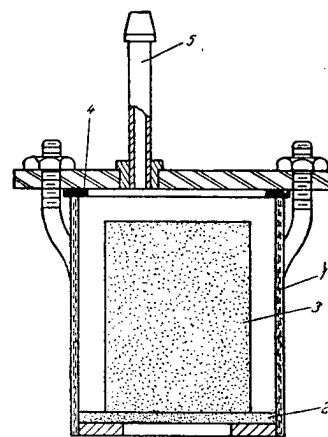


Fig. 54. Reprezentarea schematică a unui aparat de ridicare a curbei de saturație-presiune capilară, prin metoda statică, cu suprapresiune:

1 — recipient de presiune; 2 — membrană semipermeabilă; 3 — carotă; 4 — garnitură; 5 — legături pentru aer sub presiune.

echilibru corespunzătoare presiunii aplicate scade de asemenea. Atingerea practică a echilibrului este verificată prin scoaterea carotei și prin cîntărirea ei. Operația de cîntărire este ea însăși o cauză de erori, deoarece, în timpul cîntăririi proba poate să piardă apă prin evaporare, cum și din cauza necesității de umezire a membranei semipermeabile. Accelerarea operațiilor de cîntărire reduce pierderile prin evaporare, dar micșorează precizia operației. În total, o probă completă durează 10—15 zile, astfel încît operația nu poate fi concepută economic decît într-un laborator centralizat care lucrează în mare serie.

În cazul presiunilor inferioare celei atmosferice, pentru probe de dimensiuni mici, se folosește o metodă de lucru care nu mai necesită scoaterea probei din situația de contact capilar cu membrana semipermeabilă, saturația în apă rămasă a carotei fiind determinată prin diferența dintre apa inițial conținută la saturația totală și cea evacuată prin aplicarea depresiunii.

Probă saturată total cu apă 1, căreia i s-a determinat în prealabil volumul de pori și volumul brut, este așezată în contact capilar, cu fața plană pe membrana semipermeabilă 2 (fig. 55). Aceasta este așezată pe un suport mecanic poros, constituit de obicei dintr-o placă de porțelan nesmălțuit. Placa este fixată etanș într-o pilnie 3 terminată cu un capilar etalonat 4, a cărui extremitate este în legătură cu o trompă de vid 5 și cu un manometru cu mercur 6.

Cînd pilnia 3 este plină cu apă iar capilarul 4 este umplut cu apă parțial, pînă la un reper notat, se aplică cu ajutorul trompei de vid 5 o depresiune care se menține timp de cîteva

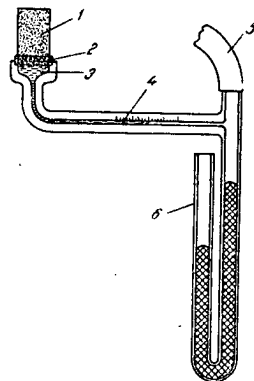


Fig. 55. Reprezentarea schematică a unui aparat de ridicare a curbei de saturație-presiune capilară prin metoda statică, cu presiune inferioară celei atmosferice: 1 — carotă; 2 — membrana semipermeabilă; 3 — pilnie; 4 — capilar etalonat; 5 — legătură la rezervorul cu presiune subatmosferică; 6 — manometru diferențial cu mercur.

minute. Dacă depresiunea aplicată este mai mare decît presiunea de dezlocuire, are loc o expulzare de apă din carotă, ceea ce se observă prin migrarea meniscului din tubul 4. Dacă se observă această mișcare, se continuă menținerea depresiunii pînă ce meniscul atinge o poziție staționară. Se notează depresiunea și volumul de apă expulzat, determinîndu-se valoarea saturației rămase, ca fiind:

$$S_{ru} = 1 - \frac{a_e}{V_b \cdot m}, \quad (29)$$

în care:

- S_{ru} — este saturația în fază umezitoare (apă) rămasă, fracțiune subunitară;
- a_e — volumul apei eliminate, citit în capilarul 4, în cm^3 ;
- V_b — volumul brut al probei, în cm^3 ;
- m — coeficientul de porozitate al probei, fracțiune subunitară.

O condiție esențială de lucru rezultă din caracterul de ireversibilitate al procesului de desaturare: presiunea capilară (diferența de presiune aplicată celor două faze) trebuie sporită treptat și în același sens.

O probă la care în cursul operațiilor, din motive accidentale, diferența de presiune aplicată a scăzut (îndeosebi în faza finală, a stabilirii echilibrului de saturație-depresiune, și în special dacă această depresiune scăzută a putut acționa efectiv) nu mai poate fi continuată. Admisibile sînt numai scăderi de mică durată și de mică valoare, numai în perioada inițială a aplicării sporului de depresiune, cînd echilibrul de saturație cu noua depresiune sporită este încă departe de a fi atins.

Una dintre dificultățile cele mai importante, comune ambelor metode statice, o constituie realizarea unei membrane semipermeabile satisfăcătoare. În general, o membrană semipermeabilă care să lase să treacă apă și să nu lase să treacă gazele, sub diferențe de presiune de ordinul a cîteva atmosfere nu poate fi decît o membrană cu pori atît de fini, încît permeabilitatea ei față de apă este de asemenea foarte redusă, ceea ce conduce la durată foarte mare citată. În scopul economiei de timp, se renunță deseori la ridicarea completă a curbei, efectuîndu-se numai determinarea saturației cu apă asociată prin aplicarea directă de la început a depresiunii corespunzătoare diferenței de densitate dintre țitei și apă și diferenței de nivel dintre baza zonei de tranziție apă-țitei și locul de unde a fost extrasă proba examinată:

$$P_c = (Z_0 - Z_p)(\rho_a - \rho_t)g, \quad (30)$$

unde

- P_c — este diferența de presiune (presiunea capilară) dintre faza existentă în proba examinată în situația de zăcămint, egală cu diferența de presiune de aplicat, în dyne/cm^2 ;
- Z_0 — cota sau adîncimea bazei zonei de tranziție apă-țitei, în cm ;
- Z_p — cota sau adîncimea probei, în cm ;
- ρ_a — masa specifică a apei de zăcămint, în g/cm^3 ;
- ρ_t — masa specifică a țiteiului de zăcămint, în g/cm^3 ;
- g — accelerația gravitației $\sim 981 \text{ cm/s}^2$.

O astfel de membrană se realizează de obicei prin precipitarea în porii plăcii de porțelan a unui gel de ferocianură cuprică, produs de reacția dintre CuSO_4 și $\text{Fe}(\text{CN})_6\text{K}_4$, alături prin hîrtii filtrante speciale foarte fine tratate în mod asemănător, prin discuri de praf de sticlă semiaglomerat, etc. Membranele semipermeabile care se pot realiza în laborator se comportă și ele ca orice mediu poros, prezentînd o «presiune de dezlocuire», la depășirea căreia membrana devine permeabilă și pentru faza neumezitoare. Valorile curențe ale presiunilor de dezlocuire prezentate de membranele obișnuite sînt de ordinul 0,5–3 at, în general mai apropiate de limita inferioară a intervalului. Eliminarea membranelor este condiționată de eliminarea necesității contactului capilar dintre faza de umezire, internă carotei

și mediul cu presiune mică, exterior. Aceasta se realizează prin metodele dinamice.

2. **Metode dinamice.** La aceste metode diferența de presiune dintre faze se realizează prin introducerea lor într-un cîmp gravitațional amplificat prin inerție (cîmp centrifugal). Datorită diferenței de masă specifică a celor două faze, la egală accelerație centrifugă aplicată, particulele de fluid exercită presiuni radiale centrifuge proporționale cu masele specifice. În cîmpul gravitațional centrifug, accelerația avînd o variație sensibilă, proporțională cu pătratul razei, presiunile nu mai sînt uniforme în toată masa fazei umezitoare (apă). Prin neglijarea efectului accelerațiilor centrifuge asupra masei specifice foarte mici a aerului, presiunea poate fi încă considerată uniformă în toată masa fazei neumezitoare cu distribuție continuă. În masa lichidă umezitoare, într-un element de secțiune presiunea ce acționează normal pe rază este determinată de forțele de inerție date de toate masele de lichid din coloana cuprinsă între elementul considerat și axa de rotație. Saturația medie a probei într-un anumit stadiu al procesului de desaturare, singura care poate fi determinată, este funcție de repartitia presiunilor în porțiunea saturată cu lichid a probei.

Determinarea analitică a relației dintre saturație și presiune prin eliminarea parametrului accelerației fiind dificilă, se preferă de obicei determinarea saturației în funcție de presiunea corespunzătoare unei accelerații medii fictive, constantă în toată porțiunea saturată cu lichid a probei.

Din comparația aproximației astfel realizate și a calculului exact rezultă o coincidență satisfăcătoare, dacă se respectă condiția $r_1 > 0,7 r_2$, unde r_1 este raza corespunzătoare suprafeței de depresiune capilară și r_2 — raza corespunzătoare feței de ieșire din probă a lichidului.

Valoarea presiunii capilare este, în acest caz:

$$p_c = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r_1^2 - r_2^2), \quad (31)$$

unde

p_c este presiunea capilară echivalentă, în dyne/cm²;

ρ — masa specifică a lichidului, în g/cm³;

ω — viteza unghiulară de rotație a centrifugei;

r_1 și r_2 — razele corespunzătoare celor două fețe extreme (după rază) ale probei, în cm.

Saturația medie a probei se determină citind cantitatea de lichid colectată într-o pipetă fixată în centrifugă în prelungire (după rază) a probei.

Prin antrenarea centrifugei în mod treptat, la viteze crescînde, se realizează presiunii crescînde și se trasează curba $S_u = S_u(p_c)$.

Aparatura. Centrifugele folosite trebuie să permită fixarea rigidă a unui număr, în general

par, de probe, pentru echilibrare. Pentru a evita reacțiuni exagerate ale sistemului de rezemare, acesta este realizat elastic, pe blocuri de cauciuc. În general, însă, dată fiind necesitatea lucrului la viteze variate și imposibilitatea unei echilibrări perfecte a sistemului învîrtitor, este necesară o rezemare foarte robustă și o transmisie elastică (v. fig. 56).

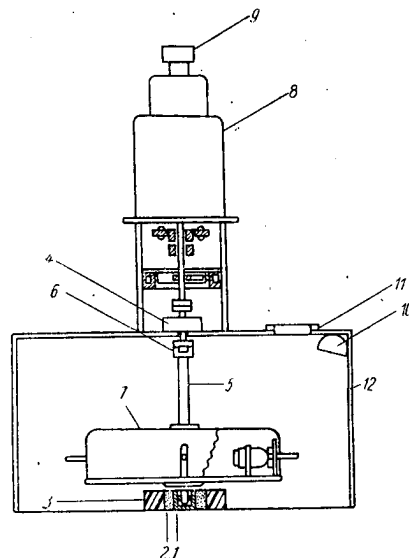


Fig. 56. Schema unei instalații de desaturare prin centrifugare, cu ridicarea curbei $S_u = S_u(p_c)$:

1 — rulment radial; 2 — manșon de cauciuc; 3 — manșon metalic de rezem; 4 — rulment axial; 5 — arborele rotorului centrifugei; 6 — cuplaj elastic; 7 — carcasa rotorului; 8 — electromotor; 9 — comanda regulatorului centrifugal; 10 — lampă; 11 — fereastră de observație; 12 — carcasă de protecție mecanică (blindaj).

Tabela 2 cuprinde valorile funcției $\frac{a}{g} = r \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2$ pentru diferite viteze de rotație n și pentru diferite raze r .

n. Concluzii asupra modificării legii de curgere prin medii poroase, datorită prezenței altor faze

Legile de curgere laminară de tipul cunoscut (ec. 22 Cap. III), nu mai sînt aplicate în cazul unei saturații eterogene a mediului poros. Pentru adaptarea lor exclusiv la gama de saturații în care curgerea poate avea loc sub acțiunea unui gradient de presiune oricît de mic, este necesară înlocuirea coeficientului de permeabilitate relativă k_g , k_r sau k_a al fluidului la a cărui curgere se referă ecuația, și al con-

CONDIȚIILE CURGERII ETEROGENE

419

Tabela 2. Valorile relative ale accelerației centrifuge (în comparație cu cea terestră), în funcție de raza medie r , în cm, și de viteza de rotație, n , în rot/min.

10-2. n, rot/min.	a/g pentru raza r, în cm										
	10 cm	11 cm	12 cm	13 cm	14 cm	15 cm	16 cm	17 cm	18 cm	19 cm	20 cm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1,118	1,230	1,342	1,454	1,565	1,676	1,789	1,900	2,012	2,124	2,236
2	4,47	5,03	5,47	5,93	6,38	6,84	7,30	7,75	8,22	8,67	9,12
3	10,07	11,07	12,08	13,09	14,10	15,10	16,11	17,12	18,13	19,13	20,14
4	17,84	19,61	21,40	23,00	24,97	26,74	28,52	30,31	32,10	33,88	35,67
5	26,89	29,58	32,27	34,95	37,63	40,33	43,02	45,71	48,40	51,09	53,78
6	40,23	44,25	48,28	52,30	56,32	60,35	64,38	68,40	72,40	76,42	80,45
7	54,75	60,22	65,70	71,18	76,64	82,13	87,60	93,10	98,60	104,10	109,50
8	69,8	76,78	83,72	90,75	97,75	104,7	111,7	118,7	125,7	132,7	139,6
9	90,4	99,40	108,4	117,5	126,5	136,6	144,6	153,7	162,7	171,7	181,8
10	111,8	123,0	134,2	145,4	156,5	167,6	178,9	190,0	201,2	212,4	223,6
11	135,5	148,1	162,7	176,2	189,7	203,2	216,8	230,4	243,9	257,5	271,0
12	190,9	177,0	193,0	209,1	225,2	241,3	257,4	273,5	289,6	305,6	321,8
13	188,7	207,5	226,4	245,2	264,1	283,0	301,8	320,7	339,6	358,5	377,4
14	219,0	290,9	262,8	284,7	306,6	328,5	350,4	372,3	394,2	416,1	438,0
15	251,0	276,1	301,2	326,3	351,4	376,5	401,6	426,7	451,8	476,9	502,0
16	275,5	308,1	330,6	358,5	375,7	413,3	440,8	468,4	496,0	523,5	551,0
17	310,5	341,5	372,6	403,6	434,6	465,7	496,8	527,8	558,9	589,9	621,0
18	362,0	398,1	434,3	470,5	506,7	542,9	579,0	615,2	651,4	687,6	724,0
19	403,0	443,3	483,6	523,9	564,1	604,4	644,6	685,0	725,3	765,6	806,0
20	457,0	501,3	548,6	594,0	639,7	685,4	731,1	776,8	821,5	868,4	914,0
21	492,5	517	591	640	689	739	788	847	886	936	985
22	540,5	594	648	702	756	810	865	919	973	1027	1091
23	581,5	641	710	769	828	887	946	1006	1065	1123	1183
24	644,0	708	772	837	901	966	1030	1094	1159	1224	1288
25	698,0	768	838	906	977	1047	1117	1187	1256	1326	1396
26	750	825	900	975	1050	1125	1200	1275	1350	1425	1500
27	814	895	977	1048	1139	1222	1303	1384	1465	1547	1628
28	877	965	1053	1141	1228	1316	1404	1492	1579	1667	1754
29	940	1037	1128	1223	1316	1410	1504	1598	1692	1786	1880
30	1007	1107	1208	1308	1409	1520	1611	1711	1812	1913	2014
31	1073	1181	1288	1395	1503	1610	1718	1825	1933	2040	2146
32	1144	1258	1373	1487	1602	1716	1830	1945	2059	2173	2288
33	1217	1338	1460	1582	1704	1825	1947	2069	2190	2312	2434
34	1292	1422	1551	1680	1808	1938	2067	2196	2325	2455	2584
35	1366	1502	1638	1775	1912	2049	2185	2322	2458	2595	2732
36	1448	1593	1738	1883	2027	2172	2317	2462	2607	2752	2896
37	1529	1682	1835	1987	2140	2294	2446	2600	2753	2906	3120
38	1612	1772	1934	2094	2256	2417	2579	2740	2901	3064	3244
39	1698	1868	2038	2207	2377	2547	2717	2887	3056	3226	3396
40	1785	1963	2141	2320	2498	2677	2856	3035	3213	3392	3570

Observație. Ultima cifră a fiecărei mărimi indicate (a/g) este numai probabilă.

diților de saturație în care are loc curgerea.
Ecuațiile menționate devin:

$$\begin{aligned}\bar{v}_t &= -\frac{k_t}{\mu_t} k \nabla (p - \rho_t g z); \\ \bar{v}_g &= -\frac{k_g}{\mu_g} k \nabla (p - \rho_g g z); \\ \bar{v}_a &= -\frac{k_a}{\mu_a} k \nabla (p - \rho_a g z),\end{aligned}\quad (32)$$

unde

\bar{v}_t , \bar{v}_g și \bar{v}_a — vectorii viteze de filtrație ai fazelor respective, în cm/s;
 k_t , k_g și k_a — permeabilitățile relative ale mediului față de țigă, de gaze, respectiv față de apă, fracțiuni subunitare;
 k — permeabilitatea absolută a mediului, în darcy (10^{-8} cm²);

p este presiunea efectivă a fluidului respectiv în punctul respectiv, în at;

ρ_t , ρ_g și ρ_a — masele specifice ale fluidelor respective, în g/cm³;

g — accelerația gravitației, în cm/s²;

z — cota punctului în care se determină viteza, dedesubtul planului de referință, în cm.

Pentru cazul curgerii a două faze, dintre care una umezitoare și alta neumezitoare, determinarea permeabilității relative se poate face fie cu formulele empirice expeditivă (17) și (18) respectiv (19) (21 b), fie cu formula (33) fundată parțial din punct de vedere fizic:

$$k_u = \frac{16 S_u^2 (S_u - S_u')^3 (1 - S_u')}{[2 S_u^2 (2 - 3 S_u') + 3 S_u S_u' (3 S_u' - 2) + S_u' (4 - 5 S_u')]^2} \quad (33)$$

Notațiile sînt cele folosite la formula (17), cu observația că saturația limită S_u' din formula (33) este cea obținută static, prin metoda de desaturare prin presiune capilară, în general, întrucîtva inferioară valorii determinate prin procesele dinamice de desaturare (de tipul b) (ref. F. a. 2).

Permeabilitatea relativă față de faza neumezitoare nu poate fi dedusă pe aceeași cale decît introducînd noțiunea de fracțiune blocată ψ_u a saturației în faza umezitoare. Aceasta este definită ca fiind egală cu fracțiunea din volumul de pori necomunicanți, care dă naștere diferenței dintre porozitatea efectivă m_e și cea dinamică m_d :

$$m_d = m_e (1 - \psi_u). \quad (34)$$

Cu ecuațiile (34) și (35) se determină permeabilitatea relativă:

$$k_n = \frac{16 S_n^2 (S_n - S_n')^3 (1 - \psi_u - S_n')}{A} \quad (35)$$

unde:

$$A = [2 S_n^2 (2 - 2 \psi_u - 3 S_n') + 3 S_n S_n' (3 S_n' - 2 + 2 \psi_u) + S_n' (1 - \psi_u) (4 - 4 \psi_u - 5 S_n')]^2.$$

Dată fiind complexitatea și precizia lor relativă, se preferă, în general, ecuațiile (17) — (21 b), mai ușor de aplicat.

Ecuațiile (32) reprezintă o primă treaptă de aproximație prin considerarea unei presiuni uniforme p , în toate fazele; în realitate, presiunile diferă între două puncte înfinit apropiate situate în faze diferite, tocmai cu valoarea presiunii capilare, p_c . Notînd cu \bar{p} presiunea medie (în cazul prezenței a numai două faze, de exemplu, țitei și gaze):

$$\begin{aligned} p_g &= \bar{p} + \frac{p_c}{2}; \\ p_t &= \bar{p} - \frac{p_c}{2}, \end{aligned} \quad (36)$$

ecuațiile (32) devin:

$$\begin{aligned} \bar{v}_g &= - \frac{k_g}{\mu_g} k \left(\nabla \bar{p} + \frac{1}{2} \nabla p_c - g \nabla \rho_g z \right); \\ \bar{v}_t &= - \frac{k_t}{\mu_t} k \left(\nabla \bar{p} - \frac{1}{2} \nabla p_c - g \nabla \rho_t z \right). \end{aligned} \quad (37)$$

Deoarece gradientii de presiune capilară sînt mici în comparație cu cei întîlniți în mod obișnuit în zăcămintele cu presiuni mari ($\nabla p_c / \nabla \bar{p} < 10^{-3}$, de obicei), ecuațiile (37) se pot aplica practic numai în cazul zonelor de

tranziție (cazul fig. 18 și 19) și în cazul zăcămintelor în regim gravitațional, în care p este foarte mică. Efectul ∇p_c mai prezintă interes practic în unele experiențe de laborator pe modele de curgere, la care, în regiunea vecină cu limita spațială a mediului poros se dezvoltă saturații S_u mai mari (efecte de capăt). În zăcămint, efectul respectiv nu se manifestă sensibil decît în mod excepțional, în cazul zăcămintelor în regim gravitațional, în care presiunea p este foarte scăzută («suprafață liberă»).

Se presupune că un alt efect al ∇p_c este transferul de țitei din zonele cu permeabilitate mică, negolite de țitei, către cele cu structură mai grosolană, mai permeabile, invadate de apă din procesul de exploatare, adică o reducere a «limbilor» de apă formate (v. Cap. II H. a și b). Efectul este amplificat la coperișul zonei petrolifere, de diferența dintre $\nabla \rho_t z$ și $\nabla \rho_d z$. Cu toată valoarea mică a gradientilor de presiune (capilară și gravitațională) și cu toată permeabilitatea relativ redusă a rocilor colectoare în direcție normală pe stratificație, dată fiind secțiunea de filtrație considerabilă, efectul poate fi uneori important în timp.

G. MECANISMUL PROCESULUI DE GOLIRE A ZĂCĂMINTULUI DE ȚITEI ÎN CONDIȚII CARE FAVORIZEAZĂ STABILIREA A DIFERITE REGIMURI ENERGETICE DE GOLIRE

Procesul de golire a zăcămintului prin exploatare poate avea loc în condițiile particulare menționate în ce privește factorii naturali și condițiile de exploatare impuse. Este absolut necesar să se evite ideea preconcepută a unei asociații între un anumit zăcămint și un anumit regim energetic de golire, fie el chiar numai predominant. Pe lângă variația menționată a tendinței zăcămintelor de a-și schimba regimul energetic în cursul procesului de exploatare (tendința generală: regim elastic → regim cu dezvoltare → regim de gaze din soluție → regim gravitațional), intervine atît variația în spațiu, datorită atît factorilor naturali (într-un zăcămint de suprafață mare, exploatat simultan, regimul împingerii apelor marginale are o răspindire strict locală, din cauza efectului de ecranare, v. Cap. II. J. a. și b.; de asemenea regimul împingerii de către gazele libere de gaze libere, regimul strict învecinată zonei de gaze libere, regimul de gaze din soluție rămînîndu-le drept cîmp neinfluențat restul zăcămintului), cît și influența exercitată de ritmul exploatării și de repartiția debitului extras din diferitele zone ale zăcămintului.

O activare generală a ritmului extracției tînde să introducă sau să extindă un regim

de epuizare, iar o concentrare a debitelor totale planificate, asupra sondelor marginale care sînt mai mult supuse acțiunii de dezlocuire, tinde să frîneze în oarecare măsură apariția, respectiv extinderea regimului de gaze din soluție.

Este, deci, necesar să se rezerve regimurilor energetice pure funcțiunea de noțiuni auxiliare de cercetare și de comparație, folosind procedee mai concrete de analiză a comportării zăcămîntului.

Comportarea zăcămîntului în decursul exploatării este definită de obicei ca ansamblul relațiilor, dintre: timpul scurs de la deschiderea zăcămîntului, producția cumulativă extrasă (sau cu aproximație de un divizor — cantitatea de țiței inițial conținută în zăcămînt — coeficientul de extracție), variația în timpul exploatării a raporturilor dintre debitele de fluide extrase,

zuri particulare ale variantei «elastice», caracterizate printr-o viteză foarte mică de scădere a presiunii de zăcămînt.

Comportarea caracteristică a principalelor regimuri. Notînd cu π presiunea adimensională a zăcămîntului (raportul dintre presiunea rămasă și presiunea inițială), cu ϵ coeficientul de extracție (raportul dintre cantitatea de țiței extras și cantitatea de țiței inițial conținută în zăcămînt) și cu ρ rația de gaze adimensională (raportul dintre rația efectivă de producție și rația medie inițială de zăcămînt), analiza grafică a comportării caracteristice cuprinde (v. fig. 57) reprezentarea funcțiilor $\pi = \pi(\epsilon)$ și $\rho = \rho(\epsilon)$. Fig. 57 reprezintă principal caracteristicile a trei regimuri energetice tipice.

a. Regimul cu împingere de apă

Curbele I și 1 reprezintă variația presiunii, respectiv a rației de gaze, în cursul exploatării. Pentru curba I este caracteristică o scădere relativ rapidă în perioada inițială (în cazul reprezentat în fig. 57, în faza extracției primelor $\approx 10\%$ din conținutul zăcămîntului), urmată de menținerea aproape constantă a presiunii. Caracteristica reală a regimului este conservarea presiunii din faza a doua, scăderea inițială fiind datorită componentei inițiale inevitabile de regim de detentă elastică. În adevăr, pentru a se exercita efectiv o invazie și o împingere a apelor, este indispensabilă existența unei diferențe de presiune între zona acviferă și cea petroliferă; aceasta este creată de faza inițială cu componentă elastică. Alura ulterioară a variației presiunii de zăcămînt este determinată în cea mai mare parte de raportul dintre factorii favorabili (întindere mare a zonei acvifere, permeabilitate bună și uniformă, viscozitate mică a țițeiului) și cei defavorabili (debite de extracție mari, atingera presiunii de început de fierbere, exploatarea nerațională a zăcămîntului printr-o repartitie nepotrivită, între sonde, a sarcinilor de producție).

Caracteristica curbei 1 este o constantă remarcabilă a rației de gaze produse, urmată eventual de o creștere (în fig. 57) în momentul cînd un alt regim devine predominant. Ea este o consecință directă a alurei curbei I, a menținerii presiunii și împiedicării eliberării gazelor din soluție. Ușoara creștere reprezentată și în fig. 57 se datorește în mică măsură atingerii presiunii de început de fierbere, (v. zona F din fig. 213 Cap. IV, B) dar, mai ales, variației compoziției țițeiului cu poziția pe structură (v. fig. 18—22). Coeficienții de extracție care pot fi realizați în acest regim energetic sînt dintre cei mai mari, putînd atinge 80%.

b. Regimul cu împingere de gaze libere

Curbele II și 2, 3 sînt caracteristice regimului de împingere a țițeiului prin expan-

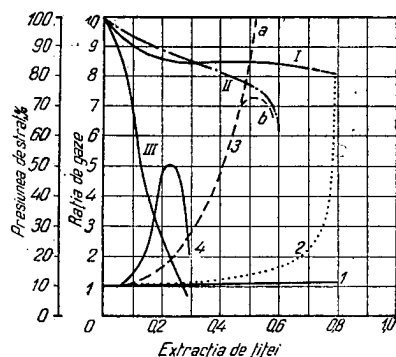


Fig. 57. Comportarea caracteristică de π , presiune adimensională, și ρ , rație adimensională, a regimurilor tipice, cu împingere de apă, cu împingere de gaze și cu dezlocuirea internă (regim de epuizare sau de gaze din soluție):

I — variația presiunii la regimul cu împingere de apă; II — variația presiunii la regimul cu împingere de gaze; III — variația presiunii la regimul cu împingere de gaze din soluție; 1 — variația rației de gaze la regimul cu împingere de apă; 2 — variația rației de gaze la regimul cu împingere de gaze pur; 3 — variația rației de gaze la regimul cu împingere de gaze cu suprapunerea efectului de gaze din soluție; 4 — variația rației de gaze la regimul cu împingere de gaze din soluție.

presiunea de zăcămînt, deplasarea limitelor zonei petrolifere, schimbarea echilibrului de faze în zăcămînt, etc.

Cea mai frecventă simplificare a noțiunii cuprinde numai urmărirea variației presiunii de zăcămînt și a rației de gaze produsă, în funcție de coeficientul de extracție.

Chiar sub această formă simplificată, analiza permite punerea în evidență a caracteristicilor regimului energetic predominant, într-o anumită perioadă, luarea de măsuri de corectare și chiar obținerea de directive generale asupra posibilităților planificabile ale zăcămîntului.

Din punctul de vedere al comportării (astfel simplificată), regimurile cu dezlocuire (de apă și de gaze libere) sînt relativ asemănătoare. Subdiviziunile lor «întreținute» constituie ca-

siunea zonei de gaze libere. Curba presiunii II indică o scădere relativ uniformă a presiunii, caracteristică unui regim elastic. În cazul unei zone de gaze libere inițiale de dimensiuni mari, panta acestei curbe se poate reduce foarte mult, curba apropiindu-se în parte de I, fără, însă, a prezenta curbura caracteristică a acesteia, în zona inițială.

Din cauza scăderii presiunii mai curînd sau mai tîrziu sub cea de saturație, acestui regim i-se adaugă o componentă de regim energetic de gaze eliberate din soluție. În cazul împiedicării acestuia (printr-o bună separare gravitațională a gazelor din țiței și prin colectarea lor în zona de gaze libere), de a-și manifesta caracteristicile proprii, curba de rație are forma (caz-limită) a curbei 2 din fig. 57, rația crescînd încet în cea mai mare parte a duratei exploatarei, pentru a crește brusc în faza finală, prin atingerea sondelor de către zona marginală a zonei de gaze libere, în extensiune. În cazul nerealizării unei separări gravitaționale eficiente, componenta de regim de gaze din soluție își face apariția vizibilă printr-o anticipare a creșterii rației de gaze, ca în curba 3, care poate lua alura 3 a, în cazul cînd rezerva de gaze a zăcămintului este mare sau cea din ramura 3 b, în cazul cînd, prin anticiparea sporirii rației se epuizează rezerva de gaze a zăcămintului. În acest caz, curba 3 prezintă un maxim (de exemplu la $\sim 730\%$, în fig. 57).

Coefficienții de extracție care se pot atinge prin aceste regimuri energetice sînt de $40-80\%$.

c. Regimul cu gaze din soluție

Regimul cu gaze din soluție este reprezentat de curbele III și 4. Caracteristicile sale sînt: o scădere mult mai rapidă a presiunii (curba III) și o creștere mult mai timpurie a rației de gaze, care, după atingerea unei valori maxime, scade destul de brusc (în funcție de ϵ , deoarece în funcție de timp scăderea sa este mai lentă în această fază de debite mai mici), v. fig. 62.

Creșterea se datorește strecurării către punctele de aflus, a gazelor eliberate, iar scăderea se datorește epuizării acestora și, deci, a zăcămintului, din punct de vedere energetic.

d. Regimul gravitațional

Regimul gravitațional nu este reprezentat în fig. 57, deoarece el nu poate apărea, în general, decît ca fază finală a unui alt regim energetic. El se caracterizează printr-o constanță remarcabilă a unei presiuni de fund scăzute, a unor debite foarte mici și a unei rații de gaze mici. Din punctul de vedere al unei economii planificate, importanța sa este relativ mică, dată fiind contribuția sa redusă la producția întregii industrii.

H. ANALIZA CU ECUAȚIILE DE BILANȚ MATERIAL A PROCESULUI DE GOLIRE A ZĂCĂMINTULUI

Pentru a analiza măsura în care acționează unii sau alții dintre factorii determinanți ai regimurilor pure menționate, cum și pentru a analiza și a urmări cantitativ procesul de golire a zăcămintului și eficiența sa, se folosesc așa numitele ecuații de bilanț material al zăcămintului. Ca urmare a condițiilor diferite de aproximație a diferiților factori care intră în ele cum și a posibilităților de a elimina unele sau altele dintre mărimile greu de determinat și care influențează puțin rezultatele, ecuațiile de bilanț material se prezintă sub aspecte relativ variate, care, de cele mai multe ori, se rezumă la exprimarea conservării gazelor conținute inițial în zăcămint (A) și, deci, a egalității volumului lor normal cu suma volumelor (raportate tot la condițiile normale) gazelor extrase (B) și ale gazelor rămase în zăcămint (C) la un anumit moment la exploatarea.

Scriind ecuația de mai multe ori, între momentul inițial al exploatarei și, respectiv, fiecare dintre momentele exploatarei pentru care se posedă date mai exacte, se poate determina un număr de parametri ai zăcămintului, egal teoretic cu numărul ecuațiilor, respectiv cu numărul de momente din evoluția efectivă a procesului de exploatare. În practică, din cauza impreciziei cu care se cunosc diferitele mărimi auxiliare, o parte din ecuații trebuie folosite ca ecuații de verificare, care procură datele necesare compensării erorilor de cunoaștere a mărimilor de plecare.

Forma cea mai practică și care permite să se urmărească eficiența procesului de golire este cea dată de prof. A. P. Crîlov:

Se notează:

N — volumul în condițiile de suprafață (normale), al țițeiului *) inițial conținut în zăcămint, în m^3 ;

V_0 — volumul în condițiile de suprafață (normale) al gazelor (libere inițial) conținute în zăcămint, în m^3N ;

b_0 — coeficientul de volum al fazei lichide inițial conținută de zăcămint (raportul dintre volumul ocupat în condițiile de strat de o anumită cantitate de lichid și volumul ocupat în condițiile de suprafață de cantitatea de fază lichidă care rezultă din prima prin detentă și prin răcire *);

*) de valoare diferită, după cum trecerea dela presiunea și temperatura de zăcămint la presiunea și temperatura de suprafață are loc în condiții de contact sau de diferențe v. IV

ANALIZA CU ECUAȚIILE DE BILANȚ MATERIAL A PROCESULUI DE GOLIRE A ZĂCĂMÎNTULUI 423

B_0 — coeficientul de volum al fazei gazoase inițial conținută în zăcămint (raportul dintre volumul ocupat în condițiile de strat de o anumită cantitate de fază gazoasă și volumul ocupat în condițiile suprafață de cantitatea de fază gazoasă care rezultă din prima prin detentă și prin răcire *);
 V — volumul spațiului de pori efectiv ** al zăcămintului, în m^3 , considerat constant, deși în realitate el are o mică variație de volum din cauza elasticității;
 $a = V_0 B_0 / b_0 N$ — raportul volumelor efective ocupate inițial în zăcămint de fază gazoasă, respectiv fazalichidă
 r_0 — rația de soluție inițială, $m^3 N$ gaze/ m^3 țitei *);
 r_t — rația de soluție la momentul t , în cursul exploatării, idem;
 x — volumul în condiții de suprafață al țiteiului *) extras până la momentul t , în m^3 ;
 b_t — coeficientul de volum al fazei lichide existente în zăcămint la momentul t (definit ca b_0)
 B_t — coeficientul de volum al fazei gazoase existente în zăcămint la momentul t (definit ca B_0).
 $V_0 = a N b_0 / B_0$
 $(N - x) b_t$ — volumul în condițiile de zăcămint, la momentul t , al fazei lichide rămase prin exploatare, în zăcămint în acel moment;
 $N r_0$ — volumul, exprimat în condiții de suprafață, al gazelor aflate în soluție în momentul inițial
 Observație: valoarea $N r_0$, ca și r_0 , depinde în măsură sensibilă de condițiile eliberării din soluție, «diferențială» sau «de contact»;
 $N \left(a \frac{b_0}{B_0} + r_0 \right)$ — volumul, exprimat în condițiile normale de suprafață, al tuturor gazelor conținute inițial în zăcămint (definind ca gaze hidrocarburile care, prin procesul de trecere de la condițiile de zăcămint la cele de suprafață ajung în acestea din urmă în stare gazoasă, în $m^3 N$);

G — rația, medie cumulativă, de producție gaze-țitei dintre gazele și țiteiul extrase din zăcămint până la momentul t , în $m^3 N / m^3$;
 G_x — volumul, exprimat în condițiile de suprafață, al întregii cantități de gaze extrase din zăcămint până la momentul t , în $m^3 N$;
 V_r — volumul efectiv, exprimat în condițiile de zăcămint din momentul t , ocupat de fază gazoasă existentă în acel moment, în m^3 efectiv;
 W — volumul, exprimat în condițiile de zăcămint din momentul t , ocupat de apa care a invadat până în momentul t o parte din spațiul de pori V , inițial ocupat de hidrocarburi, în m^3 ;
 w — volumul, exprimat în condițiile de zăcămint din momentul t , ocupat de apa extrasă împreună cu țiteiul, până în momentul t , în m^3 .

Ținând seama de faptul că volumul inițial V al spațiului de pori este considerat practic constant și egal cu cel ocupat de hidrocarburile aflate inițial în zăcămint, în condițiile respective; *)

$$V = N b_0 + V_0 B_0, \quad (38)$$

sau:

$$V = (a + 1) N b_0, \quad (39)$$

se poate determina V_r ca fiind V minus noul volum ocupat de fază lichidă și de excedentul de apă invadată în zăcămint față de cea extrasă (v. fig. 58).

$$V_r = (a + 1) N b_0 - (N - x) b_t - (W - w). \quad (40)$$

Volumul total, exprimat în condiții de suprafață, al gazelor rămase în zăcămint în momentul t se compune din volumul gazelor rămase libere, V_r (40) și din volumul gazelor rămase în soluție:

$$\frac{V_r}{B_t} + (N - x) r_t, \quad (41)$$

sau:

$$\frac{(a + 1) N b_0 - (N - x) b_t - (W - w)}{B_t} + (N - x) r_t. \quad (42)$$

*) Cap. IV.

**) Pentru simplificare în cadrul acestei probleme, fracțiunea din spațiul de pori ocupată de apă asociată, care nu participă la procesul de golire, este eliminată în toate calculele din spațiul de pori efectiv al zăcămintului. În același scop V nu cuprinde spațiul de pori al zonei acvifere. În cazurile speciale extrem de rare cînd expansiunea elastică a apei asociate are o valoare relativă importantă, simplificarea poate fi corectată prin introducerea unor termeni analogi cu cei pentru țitei.

*) Pentru simplificare, în cadrul acestei probleme, fracțiunea din spațiul de pori ocupată de apă asociată, care nu participă la procesul de golire, este eliminată în calculele din spațiul de pori efectiv al zăcămintului. În același scop, V nu cuprinde spațiul de pori al zonei acvifere. În cazurile speciale extrem de rare cînd expansiunea elastică a apei asociate are o valoare relativă importantă, simplificarea poate fi constantă prin introducerea unor termeni analogi cu cei pentru țitei.

Prin exprimarea legii conservării materiei, aplicată la gazele aflate inițial în zăcămint, respectiv după exploatare, în momentul t , parte în zăcămint, parte extrase, se obține ecuația de volume, exprimată în condițiile de suprafață:

$$N \left(a \frac{b_0}{B_0} + r_0 \right) = Gx + \frac{(a+1)Nb_0 - (N-x)b_t - (W-w)}{B_t} + (N-x)r_t, \quad (43)$$

care, după explicitarea față de N , se reduce la:

$$N \left[ab_0 \left(\frac{B_t}{B_0} - 1 \right) + B_t(r_0 - r_t) - (b_0 - b_t) \right] = x \left[b_t + B_t(G - r_t) \right] - (W - w), \quad (44)$$

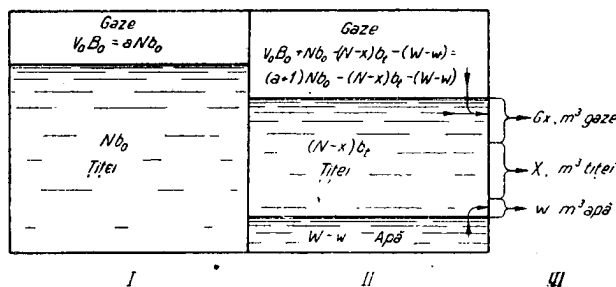


Fig. 58. Reprezentarea schematică a variației volumelor ocupate în zăcămint de diferitele faze fluide, în cursul exploatării: I — situația la momentul $t = 0$; II — situația la momentul t ; III — volumul fazelor fluide extrase, exprimat, pentru comparație tot în condițiile de zăcămint. Expresiile înscrise în diferitele poligoane reprezintă volumul efectiv ocupat de fazele respective. Acoladele limitate la zona de țiței reprezintă tendința rațională de exploatare de a nu se extrage decât fluidele care saturează zona de hidrocarburi lichide a zăcămintului.

ecuația de bază a bilanțului material pentru cazul unui zăcămint în care nu se injectează gaze, nici apă, pentru compensarea energiei de zăcămint.

Observație. În cazul existenței unei injecții de apă, ecuația rămâne identică, numai semnificația mărimii W se schimbă (v. Cap. VI.a.).

Pentru simplificarea expresiilor analitice și pentru urmărirea intuitivă a procesului, se poate scrie ecuația (44), introducând noțiunea de coeficienți de volum bifazici (v. fig. 211 Cap. IV):

$$u_t = b_t + (r_0 - r_t) B_t, \text{ respectiv } u_0 = b_0,$$

u_t fiind raportul dintre volumul efectiv ocupat în condițiile de presiune și de temperatură din momentul t , de hidrocarburi (atit gazoase, cit și lichide, justificarea denumirii « bifazice ») provenite dintr-o anumită cantitate de hidrocarburi inițiale, și volumul ocupat în condițiile de suprafață normale de faza lichidă separată în aceste condiții, provenită din aceeași cantitate inițială de hidrocarburi, (se repetă observația referitoare la modul de eliberare), sub forma:

$$N \left[au_0 \left(\frac{B_t}{B_0} - 1 \right) + (u_t - u_0) \right] = x [u_t + B_t(G - r_0)] - (W - w). \quad (45)$$

În această ecuație, termenul I din partea I reprezintă variația volumului zonei de gaze libere, termenul II din partea I, variația de volum generată de creșterea prin detentă a volumului hidrocarburilor inițial lichide, termenul I din partea II, volumul țițeiului și al gazelor extrase, iar termenul II din partea II,

volumul excedentului de apă invadată peste cea extrasă, toate volumele fiind raportate la condițiile de zăcămint din momentul considerat.

În această ecuație, în perioada de la începutul exploatării, se pot considera ca necunoscute N și V_0 (prin a), rezervele de țiței, respectiv

de gaze libere ale zăcămintului. În această perioadă, principala aplicație a ecuației este determinarea acestor mărimi. Încă de la primele determinări, rezultatul acestora trebuie comparat cu rezultatul evaluării acestor rezerve prin metoda volumetrică (v. Cap. VII B.a.1) cu ajutorul saturațiilor medii ale zăcămintului în momentul inițial și cu delimitarea în spațiu a acestuia pe bază de informații geologice și de rezultate obținute prin foraj. De obicei, afară de cazul existenței unei ape marginale extrem de active și a unei permeabilități excepțional de mari, se folosește în primă aproximație ipoteza $W - w \approx 0$.

Trebuie să se observe că problema constituie, în ultimă analiză, o deplasare a dificultății măsurării volumelor din zăcămint, la măsurarea volumelor extrase și presiunilor, însoțită de o atență considerare a proprietăților de variație a volumului, prezentate de fluidele din strat.

Atit în această fază inițială a utilizării ecuației de bilanț material, cit și în cea următoare, dificultatea principală constă în determinarea cit mai exactă a unora dintre cantitățile care figurează ca cunoscute ale ecuației (45): u_0 , u_t , B_0 , B_t și W . În adevăr, toate aceste mărimi figurează în comparație strinsă: u față de u_0 , ca $u_t - u_0$, B_t față de B_0 ca $B_t - B_0$ și W față de w , ca $W - w$. Dat fiind modul de comparare, prin diferențe, a unor mărimi care, în general, dar mai ales în perioada inițială, sint apropiate între ele ca valoare, erorile relative moderate comise asupra lor se transformă în erori relative mult sporite, comise asupra diferențelor respective.

Necesitatea de a determina cât mai exact valorile u și B justifică folosirea unei aparaturi de precizie (ca cea descrisă la Cap. IV B.d.2.c), și a unei tehnici cât mai îngrijite de colectare, de transvazare și de cercetare ca și cheltuirea unor eforturi deosebite pentru determinarea presiunilor dinamice ale zăcămintului și, în special, a valorii medii a acestora la un moment dat, P_t care determină pe B_t și u_t .

În fazele ulterioare ale exploatării, mărimile u_t și B_t diferă din ce în ce mai mult de cele inițiale, efectul amplificării erorii relative prin diferență se reduce, dar dificultatea se deplasează în sensul determinării volumului $W - w$, respectiv W .

În perioada inițială a aplicării ecuației în scopul determinării rezervelor de țiței, în primă aproximație se admite $W - w = 0$, ceea ce nu introduce în calcul decît o eroare foarte mică. În adevăr, pe de o parte, $W - w < W$, iar pe de altă parte, W însuși este foarte mic, deoarece:

$$W_t = \int_0^t \frac{\partial W}{\partial t} dt = - \left(\frac{\partial W}{\partial t} \right)_{\text{med}} \cdot t, \quad (46)$$

iar $\left(\frac{\partial W}{\partial t} \right)_{\text{med}}$ este foarte mic, ca și timpul t pe care îl înmulțește.

$\frac{\partial W}{\partial t}$ este mic în perioada inițială, deoarece debitul de invazie este, conform legii curgerii laminare, proporțional cu diferența de presiune care îl cauzează:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{k_a}{\mu_a} k \cdot F \cdot \left(\frac{P_a - P_t}{L} \right), \quad (47)$$

unde;

- k_a și μ_a sînt permeabilitatea relativă față de apă, respectiv viscozitatea apei;
- F — secțiunea de trecere pentru invazia apei;
- L — distanța dintre zonele situate la presiunile P_a și P_t ;
- P_a și P_t — presiunile din zona acviferă, respectiv petroliferă a zăcămintului; această diferență de presiune este foarte redusă în prima parte a exploatării.

În aceeași perioadă inițială și pentru motive asemănătoare, se poate lua provizoriu $a = 0 = V_0$, atît timp cît nu este dovedită sau probabilă (datorită unor considerente particulare) existența unei zone de gaze libere *).

În faza mai avansată a exploatării, determinarea volumului W constituie punctul de

efort și se poate face prin următoarele metode: a) metode hidro dinamice, care folosesc în principiu relația de natura ecuației (47) și care, în măsura cunoașterii exacte a lui k_a (local, în zona de contact, mai ales), P_a și L , pot da rezultate utile; b) metode bazate pe studiul structural al avansării apei, de oarecare utilitate (de control) în faza mai avansată a exploatării; c) metoda aplicării cu repetiție a ecuației bilanțului material, considerînd pe W ca o necunoscută suplimentară (metodă foarte utilă, dacă se dispune de materialul documentar necesar, de un număr suficient de observații exacte); d) aplicarea directă a ecuației (47) sub forma cu dife-

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = K (P_a - P_t), \quad (47')$$

rențe finite: determinînd experimental, prin exploatare, coeficientul K .

Derivînd funcția W definită de relația (45) prin raport cu timpul se obține:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \mu + B_t (G - r_0) \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial t}. \quad (48)$$

Aplicînd această ecuație sub forma raportului creșterilor finite la perioada de exploatare în care $\frac{\Delta x}{\Delta t}$, debitul de țiței al sondelor, și $\frac{\Delta w}{\Delta t}$, debitul de apă al sondelor, pot fi ușor măsurate și în care se pot considera presiunile P_a și P_t ca rămînînd constante, se obține:

$$K = \frac{\mu_t + B_t (G_t - r_0) \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\Delta w}{\Delta t}}{P_0 - P_t}. \quad (49)$$

În general, se recomandă folosirea simultană a tuturor metodelor (a) — (d) și considerarea unei medii pentru K , ponderată cu condițiile particulare de precizie în care s-a făcut aplicarea acestor metode *).

În faza mai înaintată a exploatării, pe baza cunoașterii mai exacte a parametrilor zăcămintului, ecuația de bilanț material este folosită pentru evaluarea importanței relative cu care participă la procesul de golire mecanismele regimurilor energetice tipice: împingerea apei, expansiunea gazelor libere și lucrul gazelor ieșite din soluție. Prin explicitarea față de $x [u_t + B_t (G - r_0)]$, volumul gazelor și al țițeiului extras, în condițiile de zăcămint, și prin divizarea ambelor părți ale ecuației prin această valoare, se obține:

$$\frac{W - w}{x [u_t + B_t (G - r_0)]} + \frac{N a u_0 \left(\frac{B_t}{B_0} - 1 \right)}{x [u_t + B_t (G - r_0)]} + \frac{N (u_t - u_0)}{x [u_t + B_t (G - r_0)]} = 1 \quad (50)$$

* În adevăr, zăcămintele care au o zonă de gaze libere de dimensiuni importante sînt relativ rare, iar forajul de explorare care atacă regiunile centrale ale zonelor care conțin probabil hidrocarburi, are cele mai multe probabilități de a le detecta înainte de începerea exploatării productive a zăcămintului.

* În cazul avansării apei în regim predominant elastic, calculul lui W necesită să se facă apel la metodele hidrodinamice clasice, v. Cap. II.

Compozenții părții I reprezintă valorile relative cu care participă diferitele mecanisme de golire *) la procesul de golire (indici de activitate relativă). Astfel:

$$\frac{W - w}{x[u_t + B_t(G - r_0)]} = \zeta_a \quad (51)$$

reprezintă raportul dintre volumul apei intrate și rămasă în zăcămint (egal cu volumul de țiței și de gaze extras prin acțiunea acestei apei) și volumul total de hidrocarburi extrase, indicele de activitate al apei;

$$\frac{Na u_0 \left(\frac{B_t}{B_0} - 1 \right)}{x[u_t + B_t(G - r_0)]} = \zeta_{gl} \quad (52)$$

reprezintă raportul dintre variația volumului zonei de gaze libere (egală cu volumul de țiței și de gaze extras prin efectul expansiunii zonei) și volumul total de hidrocarburi extrase, indicele de activitate al zonei de gaze libere;

$$\frac{N(u_t - u_0)}{x[u_t + B_t(G - r_0)]} = \zeta_{gs} \quad (53)$$

reprezintă raportul dintre variația volumului hidrocarburilor rămase neextrase în zăcămint (egală cu volumul de fluide extras prin creșterea de volum a țițeiului rămas) și volumul total de hidrocarburi extrase, indicele de activitate al gazelor eliberate din soluție.

Rezultatele ecuației de bilanț mai pot fi folosite pentru evaluarea eficienței tehnice a procesului de exploatare prin calculul coeficientului de extracție, ε . Aplicat la țiței (măsurat în condiții de suprafață), el are valoarea $\varepsilon_t = x/N$. Aplicat la întregul sistem de hidrocarburi și exprimat în condițiile de zăcămint, el are valoarea:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{x[u_t + B_t(G - r_0)]}{(a + 1)Nb_0} \quad (54)$$

Este de observat că pentru determinarea coeficientului ε_t este, în general, suficient un număr mai mic de date decât pentru a lui ε_{Σ} .

Coeficientul de extracție realizat mai poate fi determinat sub forma de medie a coeficienților de extracție realizabili prin mecanismele regimurilor energetice pure (medie ponderată cu indicii de activitate relativă):

$$\varepsilon_t = \zeta_a \varepsilon_a + \zeta_{gl} \varepsilon_{gl} + \zeta_{gs} \varepsilon_{gs}, \quad (55)$$

unde ε_a , ε_{gl} și ε_{gs} sînt coeficienții de extracție în țiței ai regimurilor pure respective.

De obicei, însă, ε_a este relativ bine cunoscut (0,6—0,8) și se poate determina prin experiențe relativ ușor de realizat; ε_{gl} este aproape

la fel de bine cunoscut (0,5—0,8) sau se poate determina experimental, iar ε_t este cunoscut ca x/N . În această situație, aplicarea ecuațiilor (50) și (55) dă pe ε_{gs} , coeficientul de extracție al componentei de regim pur de gaze din soluție a regimului mixt efectiv. Aplicarea prezintă un deosebit interes, deoarece: a) ε_{gs} are o gamă mult mai largă (0,05—0,50) și b) nu se dispune de o altă metodă de determinare care să țină seamă de toți factorii care determină pe ε_{gs} , îndeosebi de gradul de separație gravitațională a gazelor de țiței.

I. MODUL DE ACȚIUNE AL FACTORILOR NATURALI DE GOLIRE A ZĂCĂMINTULUI *)

a. Regimul cu dezlocuire internă — cu gaze eliberate din soluție

Comportarea efectivă în exploatare a unui zăcămint cu regim pur de gaze din soluție prezintă o importanță deosebită prin coeficienții de extracție minimi, în general, realizați. Într-un element de zăcămint supus unui astfel de regim, ecuațiile de curgere eterogenă derivate din relațiile (14 și 15) sînt:

$$G_{cr} = r + \frac{b\mu_t}{B\mu_g} \frac{k_g}{k_t}, \quad (56)$$

$$\left(1 + \frac{\mu_t k_g}{\mu_g k_t} \frac{dS_t}{dP} \right) = S_t \lambda(P) + (1 - S_t - S_a) \varphi(P) + S_t \eta(P) \frac{k_g}{k_t}, \quad (57)$$

în care:

G_{cr} — este rația de gaze/țiței, curentă de producție, volum, în m^3N/m^3 ;

r — rația gaze/țiței, de soluție, în m^3N/m^3 ;

b și B — coeficienții de volum ai țițeiului, respectiv ai gazului, în m^3/m^3 ;

μ_g și μ_t — viscozitatea relativă a gazului și a țițeiului, în cP;

k_g și k_t — permeabilitatea relativă a mediului față de gaz, respectiv de țiței;

S_t și S_a — saturație mediului în țiței, respectiv în apă asociată;

*) Se analizează aici numai factorii determinanți naturali, (regimurile cu dezlocuire prin gaze libere și din soluție și regimul gravitațional) regimul cu împingere de apă fiind analizat în capitolul VI B.a. împreună cu factorii artificiali.

*) respectiv, forme de energie.

$\lambda(P) = \frac{B}{b} \frac{\partial r}{\partial P}$ — o funcție caracteristică a sistemului, de presiune ca variabilă independentă;

$\varphi(P) = \frac{1}{P} - \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial P}$ — o funcție caracteristică a sistemului, de presiune ca variabilă independentă, cu Z, coeficientul de abatere al gazului de la legea gazelor perfecte;

$\eta(P) = \frac{\mu_t}{\mu_g} \frac{1}{b} \frac{\partial b}{\partial P}$ — o funcție caracteristică a sistemului, de presiune luată ca variabilă independentă.

Presupunind cunoscute valorile k , S , μ , b și B ca funcții de presiune, se pot deduce:
a) variația rației de gaze în funcție de presiune, în cursul exploatării zăcământului, și
b) variația saturației cu țiței (ceea ce revine la variația coeficientului de extracție în țiței) a zăcământului în cursul exploatării lui, prin integrarea ecuației diferențiale în S_t și P (57).

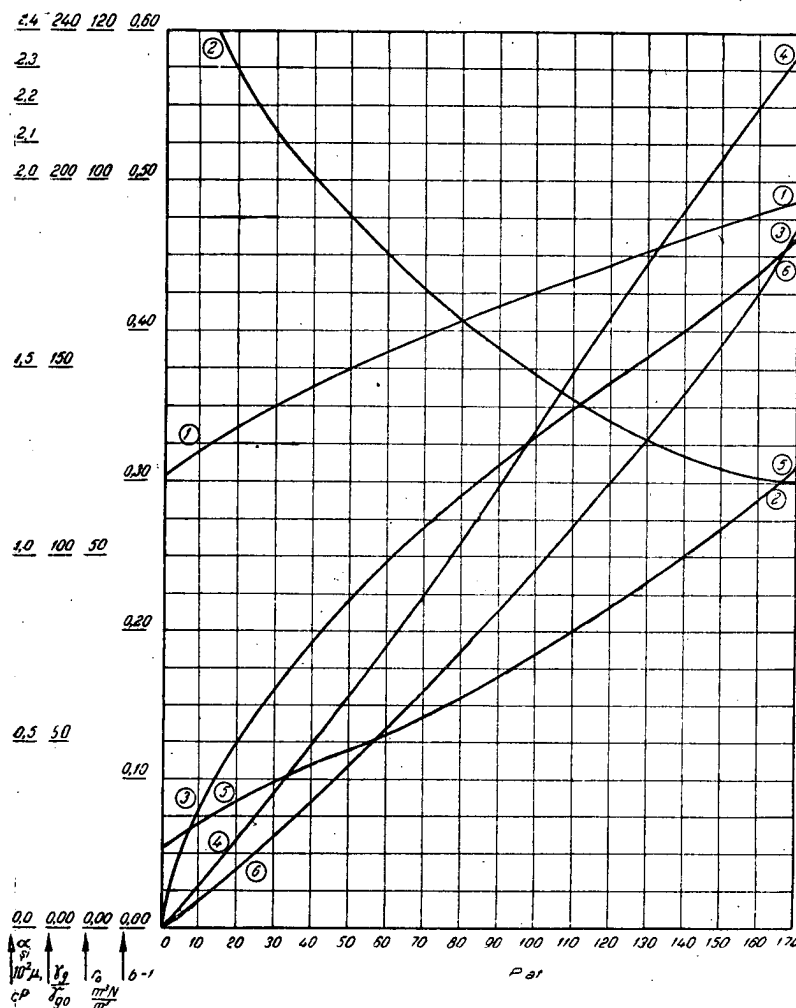


Fig. 59. Caracteristicile sistemului de hidrocarburi studiat din punctul de vedere al procesului de golire a zăcământului sub acțiunea gazelor eliberate din soluție: 1 — $10^4 \mu_g$; 2 — μ_t ; 3 — $10^{-4} \alpha(P) = 10^{-4} \frac{b}{B} \frac{\mu_t}{\mu_g}$, pe scara viscozităților; 4 — $0,1 \gamma_g / \gamma_{g0}$; 5 — b^{-1} ; 6 — r_0 .

Rezolvarea acestei probleme în fiecare caz particular este dificilă, iar rezultatele nu sînt totdeauna justificate din cauza ipotezei inițiale (aplicarea la un element de zăcămint sau la un zăcămint în care saturația și deci și presiunea sînt foarte puțin diferite de la un punct la altul al zăcămintului, ceea ce nu se poate produce decît în cazul unei exploatare extrem de lente) și din cauza ipotezei implicite că regimul de gaze din soluție persistă în forma sa pură în tot cursul exploatareii (ceea ce revine la a presupune inexistența unei separații gravitaționale a gazelor de țiței, o astfel de separație provocînd apariția unei componente de regim de expansiune a zonei de gaze libere).

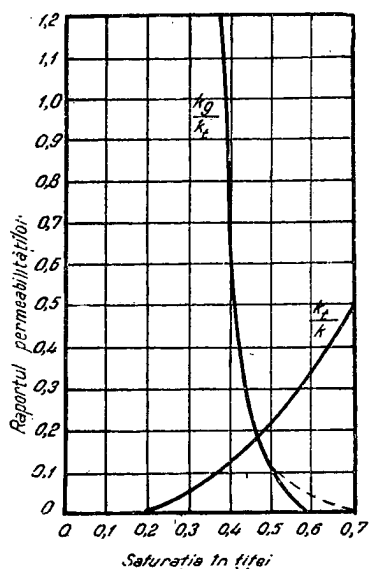


Fig. 60. Variația raporturilor permeabilităților relative în funcție de saturație, pentru roca studiată în exemplul considerat în fig. 59.

Pentru analiza comportării unui caz particular, dar relativ reprezentativ, s-au rezolvat ecuațiile (56) și (57) pentru un zăcămint cu presiunea inițială de 170 at, cu o rocă colectoră avînd porozitatea $m = 0,25$ și permeabilități relative variînd cu saturația, după curbele reprezentate în fig. 60, saturația constantă în apă, $S_a = 0,30$, cu un sistem gaze-țiței avînd funcțiile caracteristice indicate în fig. 59 și 61 obținîndu-se curbele (a) și (b) din fig. 62.

Saturația reziduală, în țiței, a roci scade treptat cu presiunea în cursul exploatareii, mai repede la început, mai încet la sfîrșit (variația vitezei ei de scădere ar fi mult mai accentuată într-o reprezentare în funcție de timp, luat ca variabilă independentă).

Rația de gaze instantanee, Q_{gr} , are o variație cu totul caracteristică: la început (între 170 at și 126 at), cit timp țițeiul, deși saturat încă de la 170 at, reține ocluse în el bulele de gaze degajate, din cauză că saturația în gaze este mai mică decît aceea la care k_g devine $\neq 0$, rația scade, țițeiul intrînd în sondă numai cu cantitățile de gaze pe care le mai are în soluție.

Aceste cantități scad conform curbei 6 din fig. 59. Această caracteristică are o deosebită importanță practică, indicînd limita pînă la care presiunea de zăcămint poate fi scăzută numai cu reducerea permeabilității relative față de țiței, dar fără alunecarea gazelor înaintea țițeiului.

De la această presiune, rația de gaze crește prin punerea în mișcare atît a gazelor eliberate prin detenta de aci mai departe, cit și a celor în prealabil eliberate. Pe măsura creșterii saturației de gaze, raportul k_g/k_l și viscozitatea țițeiului cresc, astfel încît gazele se deplasează din ce în ce mai repede decît țițeiul; ca urmare, rămîne în strat o fracțiune din ce în ce mai importantă de țiței (v. panta curbei a). Rația atinge o valoare maximă, din cauza epuizării rezervei de gaze a zăcămintului, apoi scade, cu tendința de a ajunge la zero. Ramura scăzătoare este atinsă relativ rar în exploatare (din cauza vitezelor neeconomice de golire), mai ales în cazurile cînd regimului de gaze din soluție i-se adaugă o componentă de regim cu împingere de apă, devenită mai activă din cauza depresiunii sporite, o componentă de regim cu împingere de gaze libere din zona de gaze secundară, care, în cele din urmă, se formează prin separare gravitațională, sau (și) o componentă de regim gravitațional.

Fig. 63 reprezintă comportarea aceluiași sistem în funcție de variabila independentă ε , coeficientul de extracție în țiței.

Reprezentarea din fig. 63 permite o evaluare aproximativă a coeficientului de extracție realizabil într-un astfel de regim. În cazul examinat, o golire a zăcămintului pînă la presiunea atmosferică ar da $14,3\% = \varepsilon$. Mult timp înainte de atingerea acestei presiuni, ritmul exploatareii va deveni neeconomic. Variația mai importantă de ritm are loc curînd după atingerea rației de gaze maxime, astfel încît, în cazul de față, coeficientul de extracție economic va fi probabil de ordinul a 12—13%.

Efectul caracteristicilor fluidelor din zăcămint asupra comportării. Studiul influenței diferiților parametri ai zăcămintului, luați izolat, asupra comportării lui în procesul de golire prezintă o importanță exclusiv teoretică, deoarece variația unuia dintre parametri atrage, în general, și variația celorlalți. În cazul unora dintre ei, relația de interdependență este atît de strînsă, încît studiul izolat duce la rezultate

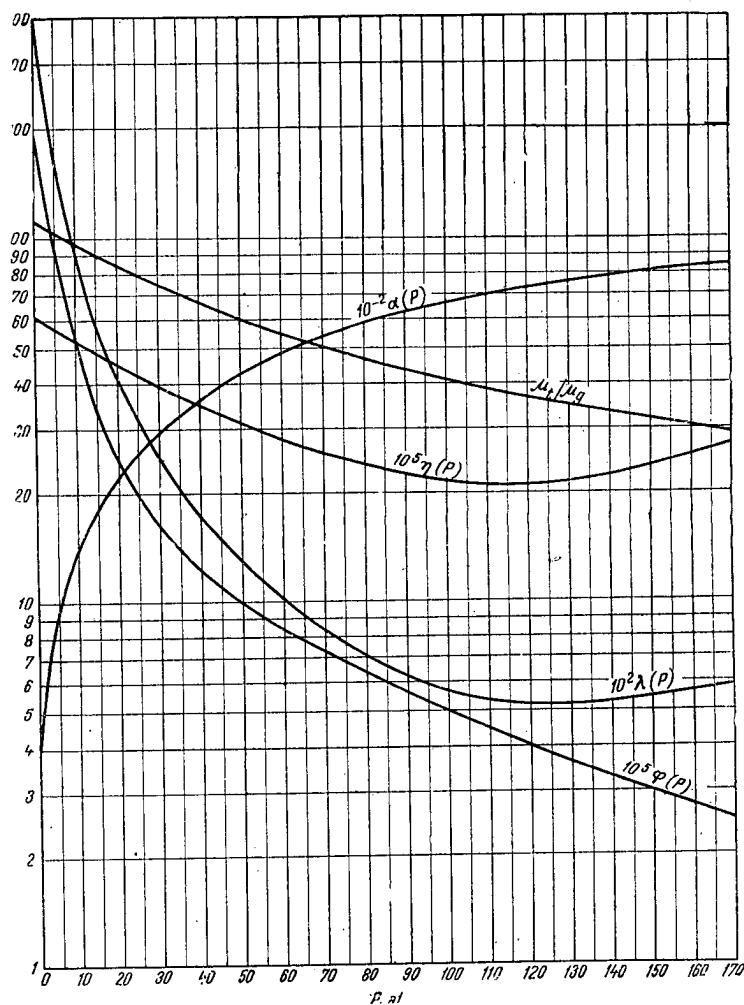


Fig. 61. Variația funcțiilor $\alpha(P)$; $\lambda(P)$; $\varphi(P)$; și $\eta(P)$, cu presiunea, pentru sistemul gaze-țiței caracterizat în fig. 59, cu $\alpha(P) = \frac{b}{B} \frac{\mu_t}{\mu_g}$.

1. — $\frac{\mu_t}{\mu_g}$; 2. — $\alpha \cdot 10^{-2}$; 3. — $10^4 \eta$;
4. — $10^4 \varphi$; 5. — $10^5 \lambda$.

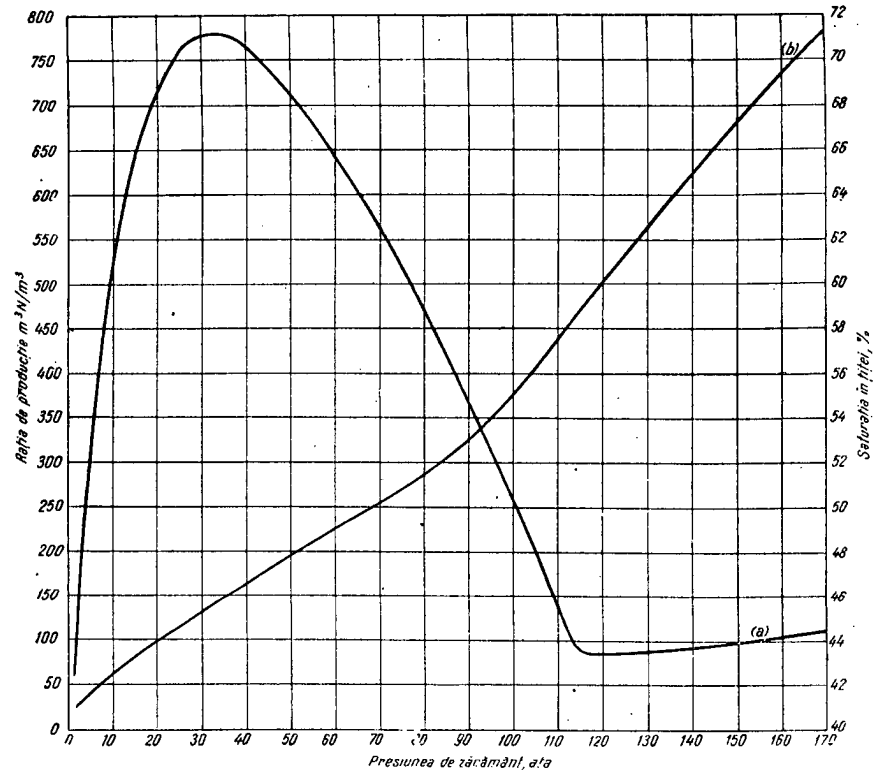


Fig. 62. Comportarea de rată de gaze și de coeficient de extracție ε reprezentat prin complementul său, saturația reziduală, în funcție de presiune, a sistemului caracterizat în fig. 59-61;
a — curba ratei de gaze; b — curba saturației reziduale.

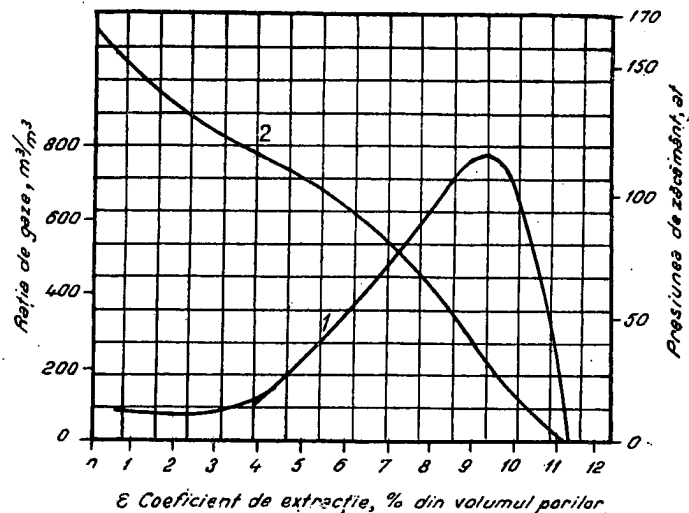


Fig. 63. Comportarea în funcție de ε , coeficientul de extracție în țitei, a sistemului studiat în fig. 62: 1 — curba ratei de gaze; 2 — curba presiunii de zăcămint.

contrare influenței reale. De exemplu, reducerea rației de gaze în soluție, inițial în țitei, considerată izolat, determină o scădere a eficienței procesului de golire. Variația rației de soluție determină însă tordeauna (și aproape cu proporționalitate) (v. Cap. IV B.2.c), scăderea coeficientului de volum, μ , și, deci, o sporire a eficienței procesului de golire. În unele cazuri, această ameliorare poate prevala chiar asupra înrăutățirii datorite direct scăderii rației de soluție.

Unul dintre efectele cele mai importante îl prezintă viscozitatea țiteiului. Fig. 64 reprezintă studiul comportării de presiune și de rație pentru un sistem asemănător celui reprezentat în fig. 59–63, cu deosebire că rația de soluție inițială este de $95 \text{ m}^3\text{N/m}^3$ la 170 at, pentru cinci țiteiuri care, în condițiile atmosferice, prezintă viscozitățile $\mu_t = 11,04 - 5,52 - 2,76 - 1,38 - 0,69 \text{ cP}$.

Într-o încercare de a reprezenta valorile medii (mai mult statistice decât efective) ale parametrilor sistemului în funcție de unul singur, s-au studiat analog comportările a cinci sisteme cu țiteiuri diferite (v. tabela 3), obținându-se rezultatele reprezentate în fig. 65.

Tabela 3. Proprietățile probabile a cinci sisteme de hidrocarburi, care dau naștere țiteiurilor din coloana (1)

$d_{15,56}^{15,56}$	r , la 203 ata, în $\text{m}^3\text{N/m}^3$	b , la 203 ata	μ_t , la 203 ata	μ_t , la 1 ata	γ_g , față de aer (la 1 ata) la 203 ata	$10^4 \mu_g$ în centipoise, la 203 ata
1,000	36,5	1,100	76	43,0	177	2,02
0,934	87,1	1,220	2,8	13,7	186	2,08
0,876	131,1	1,352	0,69	2,44	195	2,25
0,825	184	1,521	0,29	0,90	203	2,54
0,780	249	1,763	0,14	0,47	210	2,94

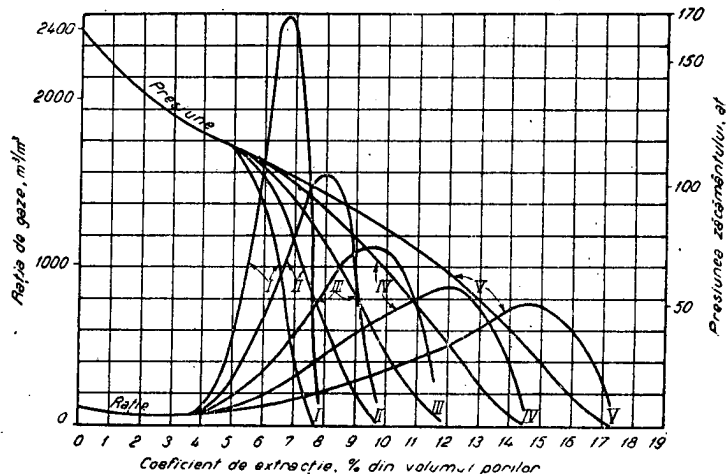


Fig. 64. Efectul viscozității asupra comportării de presiune și de rație, în exploatarea unui zăcămint în regim pur de gaze din soluție:

Curbele de rație 1 pentru: $\mu_t = 11,04 \text{ cP}$
 2 pentru $\mu_t = 5,52 \text{ cP}$
 3 pentru $\mu_t = 2,76 \text{ cP}$
 4 pentru $\mu_t = 1,38 \text{ cP}$
 5 pentru $\mu_t = 0,69 \text{ cP}$

I... V — curbele de presiune pentru aceleași țiteiuri.

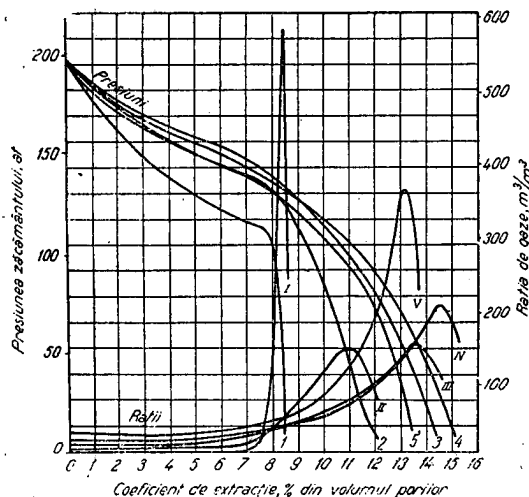


Fig. 65. Influența comună a caracteristicilor sistemului de hidrocarburi, reprezentate global prin densitatea țiteiului mort rezultat, asupra comportării în regimul pur de gaze din soluție:

I — variația rației; 1 — variația presiunii; pentru sistemul cu $d_{15,56}^{15,56} = 1,000$
 II — variația rației; 2 — variația presiunii; pentru sistemul cu $d_{15,56}^{15,56} = 0,934$
 III — variația rației; 3 — variația presiunii; pentru sistemul cu $d_{15,56}^{15,56} = 0,876$
 IV — variația rației; 4 — variația presiunii; pentru sistemul cu $d_{15,56}^{15,56} = 0,825$
 V — variația rației; 5 — variația presiunii; pentru sistemul cu $d_{15,56}^{15,56} = 0,780$

Observație. Coeficientul de extracție rezultă din compararea cu volumul de pori ($S_d = 25\%$).

Prin studiul sistemelor cu țițeiuri intermediare între tipurile 1-5 din fig. 65 și prin interpolare, se clarifică anomalia aparentă prezentată de curba 1 din fig. 65, obținându-se parametrii caracteristici din fig. 66 și coeficientul de extracție final (până la presiunea de 7 ata), saturațiile finale în gaze (până la 7 ata) și rația maximă de gaze-țiței atinsă în cursul exploatării.

b. Regimul cu expansiune a zonei de gaze libere

Deoarece un astfel de regim nu există în stare pură, ci totdeauna asociat cu o componentă de regim de gaze din soluție, examenul

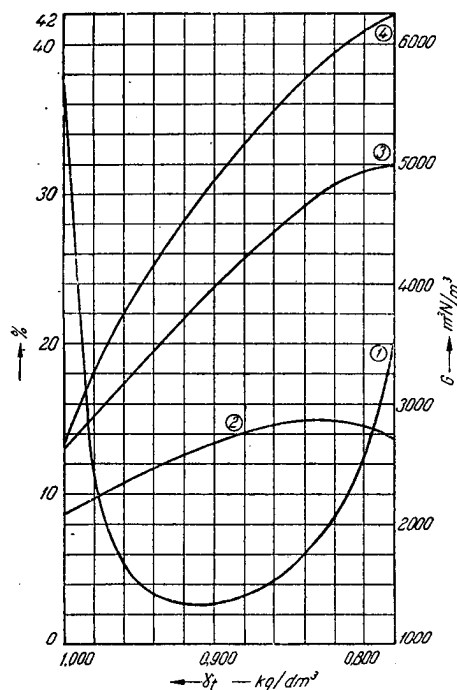


Fig. 66. Variația parametrilor caracteristici golirii prin regim de gaze din soluție, în funcție de densitatea țițeiului în condițiile de suprafață. Țițeiul este considerat saturat cu gaze la presiunea inițială de 203 ata. Procesul de golire este considerat terminat în momentul atingerii presiunii de 7 ata:

1 — curba rației maxime μ_g în m^3/m^3 ; 2 — coeficientul de extracție (raportat la volumul de pori) în %; 3 — coeficientul de extracție (raportat la țițeiul inițial) în %; 4 — saturația finală, S_g în %.

celui mai simplu caz este făcut în ipoteza că cele două regimuri lucrează în paralel, fără însă ca, prin segregarea gravitațională, gazele eliberate din soluție să alimenteze zona de gaze libere.

În aceste condiții, suprapunerea de efecte dă o comportare care poate fi analizată cu ecuația (58), în ipoteza că numai zona saturată cu țiței a zăcămintului este deschisă prin sonde:

$$\left(1 + \frac{\mu_t k_g}{\mu_g k_t}\right) \frac{dS_t}{dP} = S_t \lambda(P) + (1 - S_a - S_t) \varphi(P) + S_t \eta(P) \frac{k_g}{k_t} + a \left[b \bar{S}_{ti} \lambda(P) + (1 - S_a - b \bar{S}_{ti}) \varphi(P) - \bar{S}_{ti} \frac{db}{dP} \right] \quad (58)$$

Ecuația (58) permite, prin integrare, determinarea funcției $S_t = f(P)$, care echivalează cu $\varepsilon = f(P)$, comportarea din punctul de vedere al eficienței procesului de golire în acest regim combinat particular în care:

a este raportul dintre volumele efective inițiale ocupate de gaze, respectiv de țiței, în zăcămint;

\bar{S}_{ti} — saturația în țiței inițială, medie a zonei de gaze libere;

λ , φ și η — funcțiile de presiune definite la ecuația (57).

Pentru a analiza efectul componentei pure de regim de expansiune a zonei de gaze libere, se rezolvă ecuația (58), dînd lui a diferite valori. În particular pentru $a = 0$, ecuația (58) se transformă în ecuația (57).

Pentru exemplificare, în roca colectoare cu permeabilitățile reprezentate în fig. 60, cu sistemul de hidrocarburi caracterizat prin proprietățile din fig. 59, cu $r = 95 \text{ m}^3/\text{m}^3$ la 170 at, cu $b = 1,308$ la 170 at și cu o viscozitate a țițeiului mort, $\mu_t = 2,76 \text{ cP}$, integrîndu-se ecuația (58) succesiv pentru $a = 0$, $a = 0,2$, $a = 0,4$, $a = 0,7$ și $a = 1,0$, s-au obținut curbele de comportare din fig. 67.

Influența favorabilă a componentei de regim de expansiune a zonei de gaze libere este evidentă.

Ea este, în realitate, întrucîtva mai mare, deoarece segregarea gravitațională a gazelor eliberate din țiței are loc totdeauna în oarecare măsură; zona de gaze sporește nu numai prin expansiunea elastică ci și prin alimentare cu noi cantități de gaze, ceea ce corespunde analitic unei creșteri a lui a în cursul exploatarei.

Condițiile folosirii cit mai complete a energiei de zăcămint în procesul de drenaj sînt:

- 1) o permeabilitate absolută cit mai mare a roci colectoare, atît în direcțiile cuprinse în planele de stratificație, cit și normal pe acestea;
- 2) o izotropie (din punctul de vedere al permeabilității), cit mai mare, a roci;
- 3) o omogenitate litologică cit mai mare a roci, prezența de intercalații cu permeabilitate mică frînînd foarte mult segregarea gravitațională, îndeosebi în cazul stratelor cu înclinare mică;
- 4) o înclinare cit mai mare a stratului, îndeosebi în cazul unei grosimi mici a acestuia

sau în cazul (echivalent) prezenței unor intercalații cu permeabilitate mică;

5) viteze cit mai mici de filtrație;

6) viscozitate cit mai mică a țiteiului și tensiune interfacială gaze-țitei cit mai mică; aceste două condiții se realizează prin menținerea presiunii la valori cit mai mari.

În practică, satisfacerea condițiilor (2) și (3) lasă foarte mult de dorit, separația gravitațională nu are loc după verticală, ci, aproximativ, după linia de maximă pantă a stratului, sub influența unei diferențe de presiune (între două plane orizontale de cotă h_1 și h_2):

$$\Delta P = (h_1 - h_2) \Delta \rho \cdot g - (P_{c1} - P_{c2}) \quad (59)$$

unde

ΔP este diferența de presiune care produce segregatia, în dyne/cm²

h_1 și h_2 — cotele planelor limită considerate, în cm;

$\Delta \rho$ — diferența de densitate dintre gaze și țitei în g/cm³;

P_{c1} și P_{c2} — presiunile capilare la nivelul planelor considerate, în dyne/cm²,

cu o viteză proporțională cu sinusul unghiului de pantă (v. fig. 68).

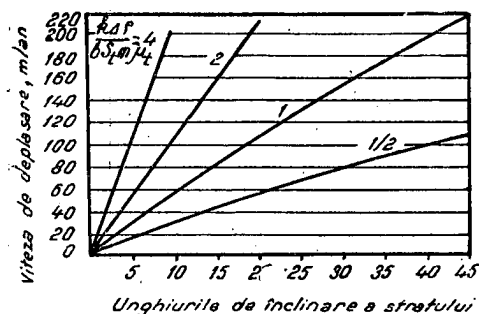


Fig. 68. Viteza segregatiei gravitaționale a țiteiului în funcție de unghiul de pantă și de caracteristicile țiteiului, ale rocei și ale gazelor exprimate, prin $K = k_t \Delta \rho / b S_m \mu_t$. Cifrele 4, 2, 1 și 1/2, indicate lângă curbe, se referă la valoarea parametrului K.

Volumul de țitei obținut prin separația în zona de țitei corespunde aproximativ ordo-

natelor curbelor din fig. 69. O exploatare cu un ritm satisfăcător a zăcămîntului permite segregatia efectivă, păstrarea unei permeabilități efective acceptabile și sporirea coeficientului de extracție peste valoarea corespunzătoare regimului de gaze din soluție la o

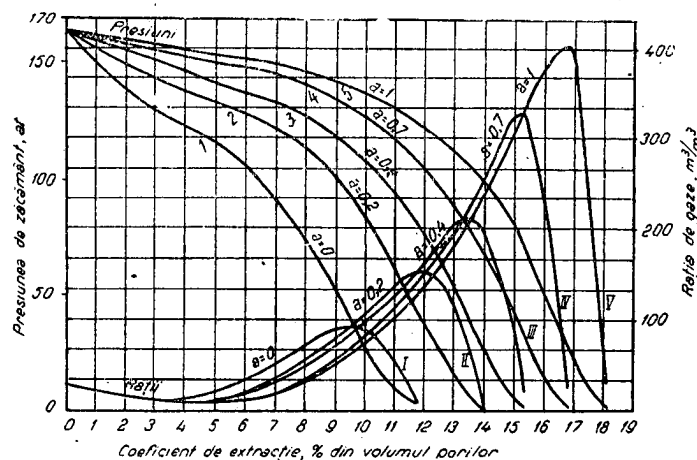


Fig. 67. Curbele de comportare în privința rației și a presiunii, în funcție de coeficientul de extracție raportat la volumul de pori, ale unui zăcămînt în care golirea se produce simultan prin acțiunea gazelor eliberate din soluție și prin expansiunea elastică a gazelor libere, fără segregatie gravitațională, în condiții de variație a dimensiunilor relative inițiale ale zonei de gaze libere, față de cea de țitei (a). Presiunea inițială de 170 at, rația inițială de soluție 95 m³/m³; coeficientul inițial de volum 1,308 m³/m³.

1 — curba presiunii, I — curba rației de gaze, pentru cazul $a = 0$; 2 — curba presiunii, II — curba rației de gaze, pentru cazul $a = 0,2$; 3 — curba presiunii, III — curba rației de gaze, pentru cazul $a = 0,4$; 4 — curba presiunii, IV — curba rației de gaze, pentru cazul $a = 0,7$; 5 — curba presiunii, V — curba rației de gaze, pentru cazul $a = 1,0$.

valoare intermediară între aceasta pe de o parte, și valorile corespunzătoare regimurilor de expansiune a zonei de gaze libere, respectiv de drenaj gravitațional, pe de altă parte.

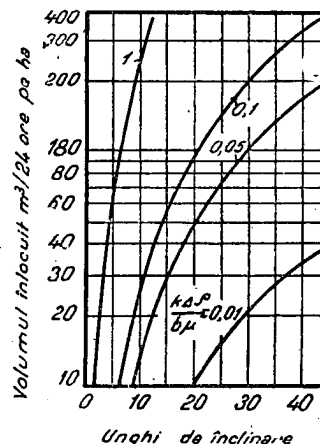


Fig. 69. Debitul de țitei, în m³/zi, ha (de proiecție orizontală de strat), trecut din zona de tranziție în zona de țitei prin segregatie gravitațională de-a lungul liniei de maximă pantă a stratului, în funcție de caracteristicile țiteiului și gazelor ($\Delta \rho$, b și μ_t) ale rocei (k_t) și panta stratului.

c. Efectul neuniformității presiunii și saturației în zăcămint

Ecuatiile (57) și (58) sînt concepute în ipoteza că saturația în țiței S_t și presiunea P au aceeași valoare în toată zona petroliferă supusă drenajului. Ele pot fi principial exacte dacă acestea, nefiind aceleași în tot zăcămintul, se înlocuiesc valorile S_t și P din ecuațiile (57) și (58) prin anumite valori medii. Aceasta nu implică folosirea unor valori medii aritmetice sau ponderate cu volumul, mai ales din cauza variației permeabilității cu saturația (v. fig. 60) și din cauza legii compunerii permeabilităților (v. analogia din Cap. III B.b.g.4). Dacă, pe un singur element relativ mic al parcursului țițeiului către gaura de sondă, permeabilitatea efectivă este redusă sensibil, permeabilitatea echivalentă a roci de pe întregul parcurs este micșorată mai mult decît ar rezulta din media ponderată cu elementele de parcurs a permeabilităților acestor elemente. De aceea, comportările analizate în fig. 62, 63, 64, 65 și 67 trebuie considerate, din acest punct de vedere, drept cazul limită cel mai favorabil. (El ar putea fi teoretic realizat, în cazul unei goliri extrem de lente).

Efectul negativ al neomogenității saturației, datorită existenței unui gradient de presiune finit care provoacă curgerea, este ilustrat mai ușor prin examinarea influenței lui asupra debitului unei sonde perfecte. În regim de curgere laminar, ecuația diferențială a curgerii radiale printr-un element de parcurs între doi cilindri circulari cu raza r_i , respectiv $r_i + dr_i$, este:

$$Q = \frac{2\pi r_i k h}{\mu_t b} k_t \frac{dP}{dr_i} \quad (60)$$

iar integrarea ei pe parcursul de la R la r dă:

$$Q = \frac{2\pi k h}{\ln \frac{R}{r}} \int_{P_1}^{P_2} \frac{k_t}{\mu_t b} dP, \quad (61)$$

în care

- Q este debitul de țiței, în cm^3/s (în condițiile de la zi);
- k — permeabilitatea absolută, în Darcy;
- k_t — permeabilitatea relativă, fracțiune subunitară, funcție de P , prin intermediul saturației;
- h — grosimea stratului, în cm;
- P — presiunea redusă, în at;
- P_1 și P_2 — presiunile la razele R (contur) și r (sondă);
- μ_t — viscozitatea țiței- } funcții de P
- b — coeficientul de vo- } prin interme-
lum al țițeiului. } diul rației de
soluție.

Reprezentînd, ca în fig. 70, $y = k_t/\mu_t b$, în funcție de P , se observă că integrala definită

respectivă, exprimată prin dreptunghiul echivalent $y(P_1 - P_2)$, prezintă valori diferite a.e ordonatei medii y , pentru diferite valori de presiuni medii, chiar dacă $P_1 - P_2$ rămîne constantă, și anume y , respectiv debitele

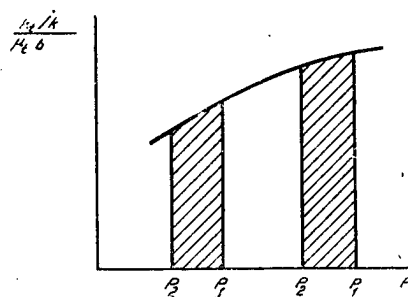


Fig. 70. Variația cu presiunea a funcției $y = k_t/\mu_t b$.

de țiței Q , produse de o aceeași depresiune motoare, scad mult cu presiunea medie și, îndeosebi, cu cea de fund P_2 . Influența fenomenului este mai importantă asupra debitului, totuși sensibilă și asupra coeficientului de extracție, deoarece pentru drenajul aceleiași cantități de țiței este necesară o diferență de presiune mai mare și, deci, un lucru mecanic mai mare.

d. Regimul de drenaj pur gravitațional

Regimul de drenaj pur gravitațional se întâlnește relativ rar și are o importanță economică redusă (debite mici), mai mult la zăcămintele în stadiu avansat de exploatare neconservativă a energiei zăcămintului, la adîncimi mici, la care permeabilitățile relativ mari îi permit o acțiune cu viteză economică. Fiind asociat deseori în oarecare măsură cu regimul de gaze eliberate din soluție, efectul său este mascat de acesta. Parametrul determinant, care grupează factorii dependenți de presiune, al vitezei verticale de curgere gravitațională este $\Delta p/\mu_t b$; el variază într-o gamă de limite în raport 1/500, după presiune și după densitatea țițeiului.

El scade cu densitatea, de la $\sim 1,4$ pentru $d_{15,56}^{15,56} = 0,780$ la $\sim 0,01$ pentru $d_{15,56}^{15,56} = 1,000$, la presiunea de 203 ata. La țițeiurile grele, el scade simțitor cu presiunea, la circa 0,0025 pentru țițeiul de 1,000 = $d_{15,56}^{15,56}$, la 7 ata. La țițeiurile mai ușoare, scade puțin, rămîne staționar sau chiar crește puțin la presiunile medii.

Drenajul gravitațional este sensibil accelerat de presiune în cazul țițeiurilor ușoare și aproape deloc la cele grele.

Permeabilitatea efectivă față de țiței, variînd în limite foarte largi (peste 1000: 1), accentuează sensibil drenajul gravitațional.

Analiza comportării în regim real (gravitațional + expansiune de gaze libere + dezlocuire internă prin gaze eliberate din soluție) este extrem de laborioasă și nu a fost încă prelucrată decât în cazuri particulare.

În cazul particular al unui drenaj pur gravitațional (țiței fără gaze în soluție), experiența a arătat o variație în timp a distribuției saturației cu înălțimea, de natura celei reprezentate prin curbele A și B din fig. 71. Curba de echilibru este echivalentă celor din fig. 52.

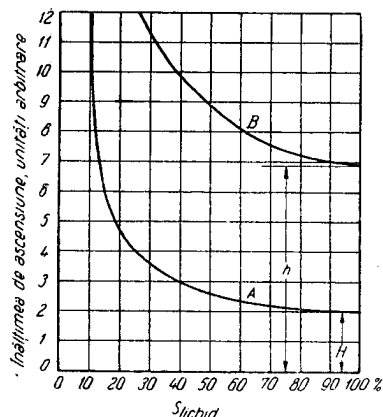


Fig. 71. Variația în timp a distribuției saturației de-a lungul unei coloane verticale de mediu poros, inițial saturat complet cu lichid lipsit de gaze. Reprezentarea schematică:

A — curba finală de echilibru; B — o curbă tranzitorie.

Deoarece această variație are loc simultan în două domenii în care saturația este diferită, cel inferior, cu $S_t = 1,0$ și cel superior suprafeței de demarcație (definită chiar prin $S_t = 1,00$), cu $S_t < 1,00$, legile care determină viteza au expresii diferite:

$$v_n = \frac{k_t}{\mu_t} k \left(\rho g - \frac{dP}{dS_t} \frac{\partial S_t}{\partial z} \right); \quad (62)$$

respectiv:

$$v_s = \frac{k_t}{\mu_t} k \left(1 - \frac{h_e}{h} \right), \quad (63)$$

unde

v_n și v_s sînt vitezele lichidului în regiunea sub-saturată, respectiv saturată, în cm/s;

k_t — permeabilitatea relativă, funcție de saturație, fracțiune subunitară;

k — permeabilitatea absolută a mediului, în Darcy;

μ_t — viscozitatea țițeiului în cP;

P — presiunea în faza lichidă, în ata;

S_t — saturația în țiței;

h_e — înălțimea de coloană de nisip pe care, la echilibru, diferența de presiune capilară între faze o menține saturată total cu țiței, în cm;

h — înălțimea corespunzătoare, la un moment oarecare, înainte de atingerea echilibrului, în cm;

z — cota punctului în care se determină viteza, în cm, sub nivelul superior al coloanei.

Pentru definirea curgerii în regiune incomplet saturată, ecuația conservării lichidului dă:

$$\frac{\partial v_n}{\partial z} = -m \frac{\partial S_t}{\partial t}. \quad (64)$$

Integrarea rezultantei din ecuațiile (62) și (64):

$$\begin{aligned} m \frac{\partial S_t}{\partial t} = & - \left(\rho g k \frac{\partial k_t}{\partial S_t} \right) \frac{\partial S_t}{\partial z} + \\ & + k \left(k_t \frac{dP}{dS_t} \right) \left(\frac{\partial^2 S_t}{\partial z^2} \right) + k \left(k_t \frac{d^2 P}{dS_t^2} + \right. \\ & \left. + \frac{dk_t}{dS_t} \frac{dP}{dS_t} \right) \left(\frac{\partial S_t}{\partial z} \right)^2 \end{aligned} \quad (65)$$

este deosebit de dificilă. Prin neglijarea ultimilor doi termeni ai ei (proveniți exclusiv din efectul diferențelor de presiune capilare) se obține o soluție de forma:

$$S_t = \Phi \left(z - \frac{\rho g k}{m \mu} \frac{dk_t}{dS_t} t \right), \quad (66)$$

în care Φ este o funcție determinată prin condiția-limită de timp $\Phi(z) = S_t$, $t = 0$, chiar ecuația care determină distribuția saturațiilor cu înălțimea, la începutul drenajului.

Pentru drenajul unei coloane complet saturată inițial,

$$S_{t=0} = 1,00$$

și

$$z = \frac{\rho g k}{m \mu_t} t f(S_t) \text{ cu } f(S_t) = \left(\frac{dk_t}{dS_t} \right), \quad (67)$$

respectiv, f^{-1} fiind reciproca funcției f ,

$$S_t = f^{-1} \left(\frac{z m \mu}{k \rho g t} \right). \quad (68)$$

Procesul de golire prin drenaj gravitațional este urmărit practic prin urmărirea deplasării zonei de demarcație, a cărei viteză de coborîre este:

$$\frac{dz_d}{dt} = \frac{v_s - v_{nd}}{n(1 - S_d)}, \quad (69)$$

unde

- z_d — este cota suprafeței de demarcație;
- v_{nd} — viteza de deplasare a lichidului de la o mică distanță deasupra suprafeței de demarcație;
- v_s — viteza de deplasare a lichidului în zona saturată cu lichid;
- S_d — saturația în țiței a unui element de rocă de la o mică distanță deasupra suprafeței de demarcație.

Dacă grosimea stratului, respectiv înălțimea coloanei drenate, este L , iar k_d este permeabilitatea relativă față de țiței în elementul de saturație S_d , se obține:

$$\frac{dz_d}{dt} = \frac{\rho g k}{m \mu_t} \frac{1 - \frac{h_0}{L - z_d} - k_d}{1 - S_d} \quad (70)$$

Prin integrarea ecuației (70) se obține o lege de variație (coborîre) a suprafeței de demar-

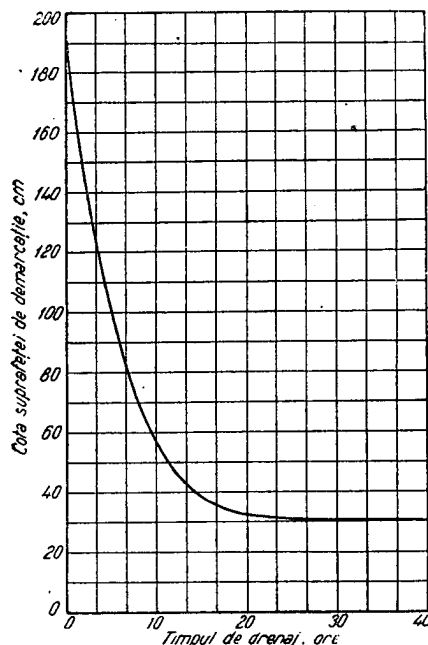


Fig. 72. Variația, în funcție de timp, a poziției suprafeței de demarcație (limita $S_t = 1$) într-o coloană verticală de nisip supus unui drenaj pur gravitațional. Compoziția granulometrică a nisipului (refuzuri) 2,45% pe sita de 0,290 mm; 14,65% pe sita de 0,193 mm; 31,5% pe sita de 0,147 mm; 30,8% pe sita de 0,104 mm; 12,14% pe sita de 0,074 mm și 2,40% trecere prin sita de 0,074 mm; țiței de $d_{15,56}^{15,56} = 0,8338$; $\nu = 0,68$ centistokes la 18°C ; tensiune superficială $\sigma = 27,7$ dyne/cm.

cație care reprezintă procesul de drenaj în ipotezele menționate (fig. 72).

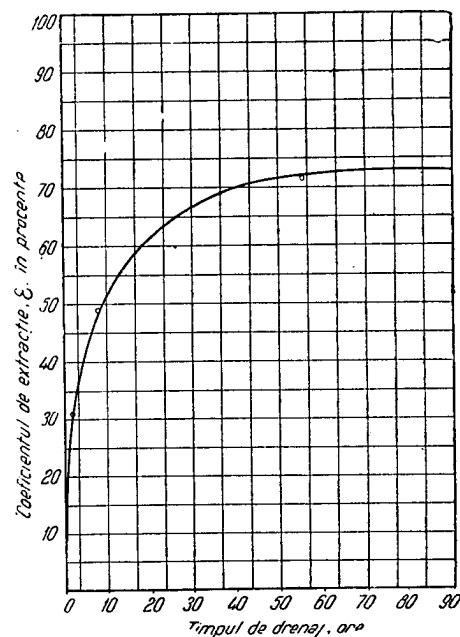


Fig. 73. Compararea valorilor calculate ale coeficientului de extracție ε (calculate curba continuă) cu cele determinate experimental (puncte izolate), asupra unei coloane de nisip de 2 m, saturată inițial complet cu țiței.

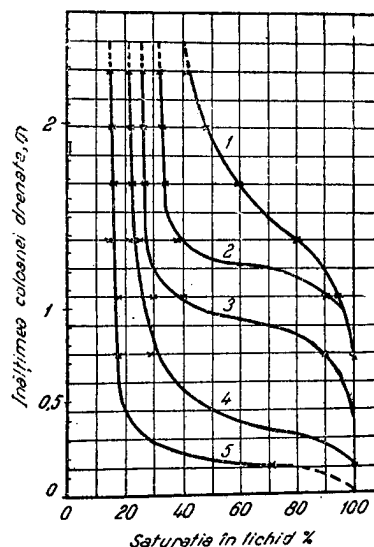


Fig. 74. Variația, în funcție de timp, a distribuției saturației într-o coloană de nisip drenat gravitațional. Determinări experimentale:

curba 1, — durată 0 h 35', $\varepsilon = 0,082$; curba 2 — durată 1 h 35', $\varepsilon = 0,164$; curba 3 — durată 3 h 51', $\varepsilon = 0,328$; curba 4 — durată 8 h 00', $\varepsilon = 0,492$; curba 5 — 56 h 00' $\varepsilon = 0,725$.

Ea reprezintă suficient de exact eficiența acestui proces de drenaj pur gravitațional, cu toate aproximațiile comise asupra ecuației (65).

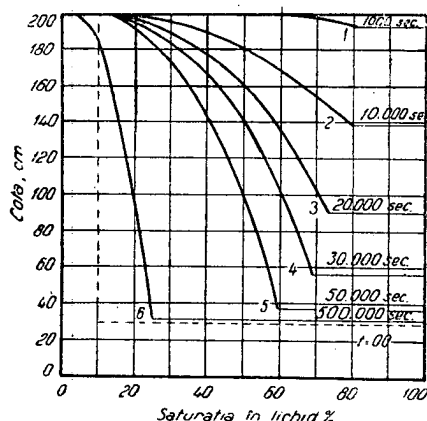


Fig. 75. Variația în funcție de timp a distribuției saturației într-o coloană de nisip drenat gravitațional, determinări analitice, cu ecuația (66).
curba 1 —durată 0 h 16' 40"; curba 2 —durată 2 h 46' 40" ; curba 3 —durată 5 h 33' 20"; curba 4 —durată 8 h 20' 00" curba 5 —durată 13 h 53' ; curba 6 —durată 139 h; curba punctată; durată înfinită (dedusă indirect, pentru saturația limită).

În fig. 73 este reprezentată curba de s astfel calculată, cum și punctele experimentale determinate asupra unui sistem nisip-țiței având caracteristicile corespunzătoare celor introduse în calcul.

Ecuația (68) este de mai puțină utilitate pentru studiul variației în timp a distribuției saturației de-a lungul coloanei drenate, din cauza neglijării efectului presiunilor capilare. Fig. 74 reprezintă variația reală, determinată experimental, cu timpul, a curbei saturației-înălțime, iar fig. 75, variația aceleiași curbe, determinate teoretic, cu (68).

Comparația este mai puțin satisfăcătoare, atât din cauza formei generale a curbelor (numai ramura de saturație vecină cu unitatea este mai satisfăcătoare), cât și din cauza diferenței de condiții de lucru, a lungimii coloanei, a saturației ireductibile etc.

e. Regimul gravitațional mixt, cu suprapunerea efectului gazelor eliberate din soluție

Acest regim gravitațional mixt, analizat în aceleași condiții ca regimul de gaze din soluție, cu suprapunerea efectului de gaze libere, ecuația (58), este examinat, în cazul cel mai general, în Cap. VI.

BIBLIOGRAFIE

- BROD I.O.: Zăcămintele de țiței și gaze, — Editura Tehnică de Stat, — Moscova, 1951.
KRİLOVA A.P. și MURAVIEV I.M.: Exploatarea zăcămintelor de țiței, — Editura Tehnică de Stat, Moscova, 1949.
KRİLOVA A.P. ș.a.: Bazele științifice ale exploatării zăcămintelor de țiței, — Editura Tehnică de Stat, Moscova, 1948.
GAZIEV C.N. și KORHANOV I.I.: Exploatarea zăcămintelor de țiței, — Editura Tehnică Științifică pentru literatură petro-lului și combustibililor minerali, Baku, 1950.
MIRCING F.M.: Geologia industrială a petrolului, — Editura Tehnică de Stat, Moscova, 1946.
SCELCAEV V. N. și LAPUK B. B.: Hidraulica subterană, — Editura Tehnică de Stat, Moscova, 1949.
MUSKAT M.M.: Principiile fizice ale extracției țițeiului, — Ed. Mc. G. Hill, New-York, 1949.
Neftionie Hoziaistvo; Colecția 1946—1948.
Dări de seamă ale Academiei de științe a U.R.S.S., 1948—1952.
Petroleum Development and Technology, A.I.M.E., colecția 1930—1940.

BIBLIOGRAFIE RECOMANDATĂ

(ulterioară elaborării capitoului)

- CIARNIÎ I.A.: Determinarea citorva parametri ai stratului cu ajutorul curbelor de restabilirea presiunii de fund a sondelor — Neft. Hoz, 3/1955, pag. 40.
KOLBIKOV U.S.: Calculul corecției de temperatură la citirea și interpretarea diagramelor de presiune înregistrate manometrul de fund — M.G.G., Neft. Hoz, 3/1955, pag. 48.
KOZLOV A.L.: Geosinclinalele și conținutul de țiței al porțiunilor marginale ale platformei, — Neft. Hoz, 3/1945, pag. 30 și 4/1945, pag. 43.
KOZLOV A.L. ș.a.: Asupra însemnătății și metodice studiului presiunii apelor subterane, — Neft. Hoz, 10/1954, pag. 30.
KUSAKOV ș.a.: Instalații pentru măsura tensiunii superficiale a țițeiului și unghiului-limită de contact, în condițiile de zăcămint, — Neft. Hoz, 2/1954, pag. 27 și 3/1954, pag. 20.
GOVOROV G.L. și AMELIND.I.: Asupra prelucrării rezultatelor cercetării sondelor de țiței în privința afluxului, — Neft. Hoz, 5/1954, pag. 42.
HUSEINOV G.P.: Comportarea de exploatare la transformarea regimului pur elastic în regim de gaze din soluție, — Neft. Hoz, 10/1954, pag. 34.
HUSEIN-ZADE M.A.: Afluxul radial simetric de lichid către sonde (respectiv influxul în strat) ținând seama de permeabilitatea culcușului și acoperișului stratului, — Neft. Hoz, 11/1954, pag. 39.
MIRZAGIANZADE A.N. și ABASOV N.I.: Aplicarea metodelor de similitudine hidrodinamică în hidraulica subterană, — Neft. Hoz, 7/1955, pag. 47.
NAMIOI A.I.: Variația temperaturii în coloanele de extracție, — Neft. Hoz, 5/1955, pag. 45.
NAZAROV S.N.: Metodica determinării permeabilității efective medii a rocilor colectoare, — Neft. Hoz, 1/1955, pag. 46.
RİBAKOV F.F.: Rolul fisurării tectonice în geologia țițeiului, — Neft. Hoz, 1/1955, pag. 53.
TREBIN E.A. și EFROS D.A.: Folosirea rezultatelor modelării pentru câteva cazuri de calculul debitelor sondelor, — Neft. Hoz, 7/1955, pag. 36.
REBIN F.A. și PUŠKUNOV N.S.: Asupra exploatării marilor zăcămintele de țiței de tipul platformă, — Neft. Hoz, 9/1954 pag. 25 și 10/1954, pag. 20.

CAPITOLUL VI

FIZICA ZĂCĂMINTELOR DE ȚITEI ȘI GAZE. DINAMICA ZĂCĂMINTELOR. FENOMENE CE AU LOC ÎN CURSUL GOLIRII ZĂCĂMINTELOR SUB ACȚIUNEA FACTORILOR ARTIFICIALI ȘI A CELOR NATURALI

A. CONDIȚIILE INTERVENȚIEI PRIN FACTORI ARTIFICIALI

a. Clasificarea procedeeelor

Din cauza imperfecțiunii procesului de golire a zăcămintelor sub acțiunea factorilor naturali, problema sporirii coeficientului final de extracție este din ce în ce mai acută. Mărirea se poate realiza intervenind asupra zăcămintului prin următoarele procedee: 1) completarea energiei, mai mult sau mai puțin epuizate a stratului, cu energie exterioară, destinată să efectueze lucrul mecanic de drenaj (uneori și de ascensiune în gaura de sondă); 2) reducerea lucrului mecanic specific de drenaj (reducerea rezistențelor opuse curgerii); și 3) procedee mixte în care se folosesc ambele modalități menționate la punctele 1) și 2).

În procedeele menționate la punctul 1) se folosește, fie injectarea unui agent motor, care acționează prin dezlocuire, prin antrenare sau pe ambele căi, fie prin reducerea presiunii dinamice de fund la valori sensibil inferioare celor obișnuite în condițiile de exploatare curente, eventual chiar sub presiunea atmosferică.

Procedeele menționate la punctul 2) sînt folosite pe scară redusă. Ele constau în reducerea viscozității fluidelor drenate, în reducerea tensiunilor interfaciale dintre fazele fluide, în sporirea tensiunii de adeziune a apei față de rocă și în reducerea tensiunii țițeiului, în sporirea (în general locală) a permeabilității rocii, în schimbarea raporturilor de fază în sistemul fluid etc.

Procedeele menționate la punctul 3) sînt, în general, de tipul celor de la punctul 1), folosindu-se în mod mai mult sau mai puțin accesoriu și efectele rezultate din cele menționate la punctul 2).

Dei cauză că la început au fost folosite numai ca mijloc de a repune în stare de producție

zăcămintele devenite neexploatabile din punct de vedere economic, datorită epuizării parțiale a resurselor energetice, toate aceste procedee au fost numite procedee de exploatare secundară *).

Datorită eficienței majorității acestor procedee, care este, în general, mult mai mare în cazul cînd sînt aplicate încă din stadiile timpurii ale exploatării zăcămintului, ele sînt folosite din ce în ce mai des de la începutul exploatării, astfel încît extensiunea noțiunii de exploatare secundară, în sens larg, la metodele de exploatare care folosesc factorii artificiali citați, a fost adeseori propusă și, în parte, admisă.

Procedeele menționate la punctul 1) cuprind: menținerea presiunii prin injectare de apă, menținerea presiunii prin injectare de gaze, refacerea presiunii prin injectare de apă, refacerea presiunii prin injectare de gaze, spălarea (antrenarea) cu apă, spălarea cu gaze, exploatarea la presiune sub cea atmosferică și exploatarea forțată. Metoda numită de «exploatare prin circulație» constituie un caz particular de aplicare a menținerii presiunii și de spălare cu gaze, folosită la zăcămintele de gaze cu condensat.

b. Condițiile fizice noi create în strat prin intervenția factorilor artificiali. Modificările proprietăților rocilor

Una dintre principalele modificări ale proprietăților rocilor este:

1. Alterarea permeabilității absolute. Considerînd permeabilitatea efectivă față de apă, în cazul unei saturații totale cu apă, $S_a = 1$, ca permeabilitate absolută, aceasta suferă

*) Se recomandă evitarea denumirii de «recuperare secundară», noțiunea de recuperare implicînd recîstigare a unei valori inițiale disponibile (s.ex. țițeiul, introdus în puț, pentru circulație sau pentru instrumentație, gazele înmagazinate în strat etc.).

reduceri foarte importante, în cazul când roca conține fracțiuni sensibile (de obicei, în liant) de hidrosilicați de aluminiu din grupul bentonitelor (montmorillonit-illit), de caolinit etc., care, prin hidratare sau prin schimb de cationi, suferă transformări ale rețelei cristaline, însoțite de importante schimbări de volum. Fenomenul se produce la pătrunderea apelor dulci în rocile saturate în prealabil cu ape sărate cu concentrații mari de Na^+ . El are loc în cursul infiltrării apei libere din noroiul de săpă în strat, în timpul forării acestuia cu noroi de apă dulce (v. Vol. I și Vol. II Cap. VIII), însă pe o zonă redusă în jurul găurii de sondă, cum și în cazul injectării de ape dulci în roci colectoare ce se găseau în prealabil în echilibru cu ape de strat cu salinitate relativ mare. El se datorește atât creșterii volumului de material argilos (creștere care nu poate avea loc decât prin reducerea spațiului de pori, a diametrelor efective ale canalelor de pori și a permeabilității), cât și, în mai mică măsură, eventualelor schimbări structurale. Materialul hidratat este, în oarecare măsură dezagregat și se consideră că o parte din el, pusă în libertate și antrenată eventual de curentul de lichid, poate bloca (efect de supapă) unele dintre canalele capilare.

Indiferent de cauza care o produce, reducerea permeabilității este deseori destul de importantă pentru a produce nereușita încercărilor de injectare de ape dulci în strat, în cazul neglijării ei în proiectare.

Chiar permeabilitatea față de apa sărată este adeseori inferioară celei față de aer sau de gaze. Lipsa de corespondență dintre permeabilitățile absolute, măsurate experimental cu aer sau cu gaze, la presiuni scăzute, pe de o parte, și cele determinate prin filtrarea apei sărate, pe de altă parte, se datorește: 1) erorii sistematice provenite din efectul de «alunecare» și 2) influenței apei asupra materialului argilos.

Efectul de alunecare constă într-o permeabilitate sporită față de gaze, la presiuni suficient de reduse pentru ca liberul parcurs mediu al moleculelor de gaze să atingă, ca ordin de mărime, valoarea diametrului canalelor capilare, astfel încât, statistic, efectul ciocnirii moleculelor de gaze cu peretele canalului capilar să nu mai fie mascat de efectul ciocnirilor moleculelor de gaz între ele.

Într-o primă aproximație, efectul de alunecare este de a spori permeabilitatea față de gaze după o lege de forma

$$k_p = k_0 \left(1 + \frac{b_p}{P} \right) \quad (1)$$

în care:

k_p este permeabilitatea medie față de gaz sub presiunea medie \tilde{P} , în mD;

k_0 — permeabilitatea medie față de gaz sub presiunea infinită *), în mD;

\tilde{P} este presiunea medie din probă în timpul probei, în ata;

b_p — o constantă caracteristică rocii și gazului, de dimensiunile unei presiuni și egală cu sporul relativ de permeabilitate pe care îl prezintă roca față de gazul respectiv la presiunea de 1 ata, în comparație cu cea prezentată, față de același gaz la o presiune medie foarte mare *).

Deși efectul, intervenind în determinarea experimentală de laborator a permeabilității absolute cu ajutorul gazelor, prezintă o importanță care ar justifica părăsirea folosirii în acest scop a gazelor și înlocuirea lor prin lichide, datorită experienței cistigate, aparaturii existente, ușurinței determinării și posibilităților de corecție, se preferă, în general, folosirea gazelor. Coeficienții b au valori mari la gazele cu greutate moleculară mică (v. hidrogenul, tabela 1) și la rocile cu granulometrie fină, din cauza apropierii diametrului mediu echivalent al canalelor capilare de valoarea respectivă a liberului parcurs mediu al moleculelor de gaz.

Analiza teoretică și verificările aproximative experimentale dau

$$b_p = \frac{4c\tilde{\lambda}}{r} \tilde{P} \quad (2)$$

unde

r este raza echivalentă din punct de vedere hidrodinamic a canalelor de pori ale rocii, în cm;

$\tilde{\lambda}$ — liberul parcurs mediu al moleculelor de gaz la presiunea medie \tilde{P} , în cm;

c — un coeficient numeric cuprins între 0,9 și 1 (incertitudinea se datorește îndeosebi necunoașterii exacte a lui $\tilde{\lambda}$).

Pentru $\tilde{\lambda}$ se dau, după diferite cercetări, relații avînd forma

$$\lambda = a \frac{\mu}{P} \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (3)$$

în care:

λ este liberul parcurs al moleculelor de gaz (medie statistică), la presiunea P , în cm;

μ — viscozitatea dinamică a gazului respectiv, în poise;

P — presiunea gazului, în ata;

R — constanta universală a gazelor, $8,2 \cdot 10^{-5}$ cm³ at/grad;

T — temperatura absolută, în °K;

M — greutatea moleculară a gazului respectiv;

a — un coeficient constant cuprins între 2,02 și 2,13, după diferiți cercetători.

*) Teoretic, presiunea de referință ar trebui să fie infinită, dar din cauză că la creșterea presiunii, k_p scade, tinzînd asimptotic către valoarea k_0 , k_p se apropie suficient de k_0 la presiuni la care densitatea gazului se apropie ca ordin de mărime de aceea a lichidelor.

Pentru identificarea și pentru separarea efectului de alunecare de cel de hidratare, în tabela 1 sînt date permeabilitățile absolute

Tabela 1. Variația permeabilității absolute față de gaze, în funcție de presiune

Carota	Gazul	Permeabilitatea, în mD, la presiunea:		Permeabilitatea la lichid inert (izooctan în mD)	Coeeficientul b la 1 ata
		1 at.	∞		
1	2	3	4	5	6
1	aer	28,2	23,6	23,66	0,195
2	H ₂	50	32	32,1	0,563
2	aer	45	32	32,1	0,406
2	CO ₂	42	32	32,1	0,313
3	aer	195	170	170	0,147
4	aer	1406	1347	1353	0,044
5	H ₂	5,64	2,75	2,55	1,051
5	N ₂	4,41	2,75	2,55	0,604
5	CO ₂	3,84	2,75	2,55	0,396
6	H ₂	15,92	11,10	10,45	0,434
6	N ₂	13,65	11,10	10,45	0,230
6	CO ₂	12,83	11,10	10,45	0,156
7	H ₂	20,8	14,76	14,68	0,409
7	N ₂	18,75	14,76	14,68	0,270
8	H ₂	44,70	35,50	36,20	0,259
8	N ₂	41,65	35,50	36,20	0,173
9	N ₂	68,9	60,2	61,2	0,145
10	N ₂	182,3	166,6	166,1	0,094
11	N ₂	223	204,3	190,7	0,092

măsurate experimental cu diferite gaze, la presiune medie egală cu cea atmosferică, permeabilitățile absolute, determinate cu diferite gaze, prin extrapolare, la presiune infinită și permeabilitățile absolute, măsurate experimental cu un lichid inert față de materialul hidratabil, izooctan.

Din aceste date rezultă că, în cele mai defavorabile cazuri (rocile cele mai fine) efectul de alunecare dă un spor de permeabilitate în condițiile de laborator față de cele de zăcămint, de ordinul a 100%.

Reduceri mai importante de la permeabilitatea de laborator (cu aer) la cea de zăcămint (cu apă sărată), atunci cînd se întîlnesc, se datoresc în general alterării prin hidratare. Pentru comparația efectului relativ redus al apei sărate cu acela al apei dulci, în tabelele 2 și 3 se dau cîteva date experimentale.

Tabela 2 cuprinde date medii statistice, inclusiv cîteva date de cazuri particulare de influență extremă a apei sărate. Tabela 3 cuprinde în mod analog cîteva date de cazuri particulare de influență extremă a apei dulci.

Din aceste date rezultă că, afară de cazul relativ frecvent al reducerii brutale a permeabilității la trecerea de la apa sărată la apa dulce, se prezintă efectiv și cazul cînd blocarea este realizată total chiar de apa sărată, ceea ce învederează necesitatea efectuării de determinări experimentale pe carote extrase din stratul res-

pectiv. Chiar în cazul unei singure formații productive, rocile colectoare prezintă o variabilitate de comportare destul de pronunțată din punct de vedere al acțiunii apei, de-a lungul normalei la stratificație, astfel încît este necesar să se

Tabela 2. Comparația permeabilităților de saturare totală, față de aer, de apa sărată și de apa dulce (Influența apei sărate)

Carota	k_a	k_s	k_d	k_a/k_s	k_s/k_d	Observații
1	2	3	4	5	6	7
1	129	0	0	∞	—	
2	41	0	0	∞	—	
3	22	0	0	∞	—	
4	3,8	0	0	∞	—	
5	1490	0,45	0	3300	∞	
6	46	0,2	0,1	230	2,0	
7	112	0,8	0,5	140	1,6	
8	105	0,9	0,9	117	1,0	
9	159	1,6	0,4	99	4,0	
10	5,5	0,07	0,07	79	1,0	
11	310	5,0	1,5	62	3,33	
12	18	0,39	0,25	46	1,56	
13	104	3,70	0,1	28	37,0	
14	1270	66	—	19	—	proba dezagregată de apă dulce
15	190	12	7,2	16	1,66	
16	71	5,4	0,0	13	∞	
17	2560	216	0,0	12	∞	
18	52	5,3	2,1	10	2,52	
19	624	85	25	7,4	3,40	
20	52400	9260	6530	5,8	1,42	
21	37	7,2	1,9	5,1	3,79	
22	455	110	105	4,1	1,05	
23	82	23	2,8	3,6	8,21	
24	2040	668	5,7	3,1	117,0	
25	1590	565	2,6	2,8	217,5	
26	4400	1810	199	2,4	9,10	
27	481	228	11	2,1	20,75	
28	1330	705	71	1,89	9,93	
29	3540	2093	2,4	1,69	872,0	
30	35	22	2,8	1,59	7,85	
31	34800	23600	9,9	1,47	2385,0	
32	440	302	0,0	1,45	∞	
33	6890	5510	330,0	1,25	16,70	
34	18800	15800	15100	1,19	1,04	
35	565	505	210	1,12	2,40	
36	81	76	66	1,06	1,15	
37	11350	10930	8950	1,04	1,22	
38	2060	2020	1630	1,02	1,24	
39	420	415	101	1,01	4,10	
40	31	31	12	1,00	2,58	

Observație: În cazurile probelor 1-5, 8, 10 și 22, acțiunea de reducere se datorește exclusiv apei sărate;
 k_a = permeabilitatea față de aer, în mD ($S_{aer} = 1$);
 k_s = permeabilitatea față de apa sărată, în mD (S_s apă sărată = 1);
 k_d = permeabilitatea față de apa dulce, în mD (S apă dulce = 1).

analizeze, la proiectarea operațiilor de injec-tare, un număr cit mai mare de carote, de preferință carotaj mecanic continuu, cel puțin la o sondă în zăcămint, însoțit de o comparație corectă a profilelor electrice și a analizelor carotelor extrase din subdiviziunile caracteris-tice ale stratului, la celelalte sonde.

În limitele de aproximație ale neglijării efec-tului mecanic de dezagregare, în general redus,

Tabela 3. Comparație între permeabilitățile de saturație totală față de aer, apă sărată și apă dulce.
(Influența apei dulci)

Carota	k_a	k_s	k_d	k_d/k_s	k_a/k_s	
1	2	3	4	5	6	7
1	18 500	3 050	0,0	0	6,06	
2	5 130	845	0,0	0	6,07	
3	440	302	0,0	0	1,46	
4	705	147	0,0	0	4,80	
5	434	39	0,0	0	11,10	
6	220	13	0,0	0	16,9	
7	22	6,7	0,0	0	3,28	
8	28	3,3	0,0	0	8,5	
9	5,8	0,2	0,0	0	29,0	
10	17 400	5 550	0,1	0,000018	3,14	
11	6 100	2 040	0,1	0,000049	3,97	
12	2 460	617	0,1	0,000162	3,98	
13	34 800	23 600	9,9	0,00042	1,47	
14	3 760	3 800	3,3	0,0087	0,97	
15	22 800	13 600	19,5	0,00143	1,68	
16	3 100	1 590	4,4	0,00277	1,95	
17	26 800	15 400	62	0,0040	1,74	
18	69	6,1	0,06	0,0098	11,3	
19	1 770	1 115	18	0,0162	63,9	
20	104	3,7	6,1	0,027	28,1	
21	344	66	3,5	0,053	5,20	
22	20 410	14 600	1 080	0,074	1,40	
23	1 200	300	30	0,100	4,00	
24	4 400	1 810	199	0,110	2,43	
25	1 020	114	20	0,175	9,12	
26	37 500	13 550	3 305	0,242	2,77	
27	926	426	140	0,328	2,17	
28	395	210	84	0,400	1,88	
29	26	2,7	1,3	0,481	9,62	
30	705	655	430	0,656	1,08	
31	2 610	2 810	2 000	0,711	0,94	
32	115	116	95	0,818	1,00	
33	2 390	1 610	1 390	0,857	1,48	
34	5 270	2 990	2 830	0,947	1,76	
35	455	110	105	0,955	4,13	
36	18 800	15 800	15 100	0,955	1,14	
37	108	78	77	0,988	1,39	
38	1 690	1 690	1 670	0,988	1,00	
39	645	573	568	0,991	1,12	
40	105	0,9	0,9	1,000	117,0	
41	52	20	20	1,000	2,67	

k_a = permeabilitatea față de aer la saturație totală, în mD;
 k_s = permeabilitatea față de apă sărată la saturație totală, în mD;
 k_d = permeabilitatea față de apă dulce la saturație totală, în mD.

alterațiile permeabilității prin hidratare pot fi considerate, practic, ca reversibile, durata de tranziție până la atingerea stării de echilibru cu noul fluid fiind de la câteva ore (mai rar), până la câteva zile (mai des). Duratele indicate se referă la condițiile de laborator (probe de dimensiuni mici). În condițiile de zăcămint, duratele sînt simțitor mai mari, în funcție de raportul de variație a permeabilității, k_d/k_s , de micro și macroanizotropia rocii din punctul de vedere al permeabilității, de lenticularitate și de alți factori.

În multe dintre cazuri, limita de concentrație în săruri care corespunde transformării $k_s \rightarrow k_d$ este situată în gama 0,1—0,2%, ceea ce permite, în cazurile respective, folosirea unei

ape de injecție procurate prin amestecarea unei mici cantități de apă de strat cu o cantitate relativ mare de apă dulce. În acest caz, însă, sînt absolut necesare studiile de stabilitate a apei de amestec și precauțiile cele mai serioase împotriva coroziunii echipamentului.

Variația permeabilității indicată în fig. 1 este caracteristică pentru reversibilitatea fenomenului.

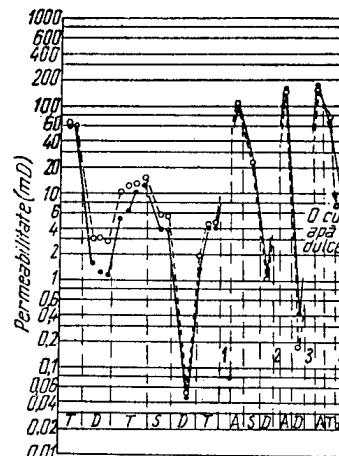


Fig. 1. Variația permeabilității față de faza total saturantă, cu timpul, faza saturantă și antecedentele. Nisip slab cimentat: T — țitei; D — apă dulce; S — apă sărată; A — aer. 1 — extracția cu solvent a carotei; 2 — uscarea carotei; 3 — uscarea carotei.

● — carota Nr. 1.
○ — carota Nr. 2.

Referitor la acțiunea apei asupra zonei de strat învecinate cu gaura de sondă v. și Cap. VIII.

2. Alterarea permeabilității prin modificarea parțială a saturației, (v. Cap. V F.a.).

3. Modificarea permeabilităților efective și a condițiilor de retenție capilară prin reactivi superficial activi v. Cap. VI C.c.

c. Dezlocuirea țiteiului din roca colectoare de către apă și gaze prin procese de tip «static»

Deși în principiu aceleași ca în cazul golirii sub acțiunea factorilor naturali, fenomenele de dezlocuire a țiteiului de către apă sau gaze sînt mai caracteristice în cazul acțiunii controlate prin injectarea unui agent de dezlocuire. Studiul experimental este efectuat, de obicei, prin metode și cu aparate analoge cu cele din cazul «c» (ref. Cap. V F.a.2.), fig. 26—28, adaptate scopului particular urmărit, asupra unui țitei mort, la presiuni apropiate de cea atmosferică.

Realizarea unor presiuni și a unor temperaturi asemănătoare celor de zăcămint este grea din punct de vedere tehnic, influența

variației viscozității se exercită mai mult asupra debitelor decât asupra rezultatelor finale, iar efectul caracteristicilor rocii este mai bine pus în evidență. Operațiile constă în saturarea unei carote cu țitei*), în introducerea ei cu fața plană în contact capilar cu membrana semipermeabilă, într-un aparat de dezlocuire, și în supunerea ei la o diferență de presiune capilară. Pentru evitarea producerii de fenomene secundare (bule de gaze ocluse), se aplică, de obicei, fazei dezlocuitoare o presiune superioară celei atmosferice; diferența de presiune este aplicată în trepte de circa 1 cm col. Hg \approx 0,02 at, notind de fiecare dată, după atingerea echilibrului, volumul țiteiului expulzat. Se obține și se reprezintă, astfel, curba de saturație-diferență capilară de presiune între faze, ramura de desaturare (v. fig. 4 și 5).

1. Dezlocuirea țiteiului prin apă. Aparatura folosită este o adaptare a celei folosite la determinarea saturației ireductibile cu apă și la ridicarea curbei saturație-presiune capilară (Cap. V F.a.2).

Fig. 2 reprezintă schematic aparatul folosit la dezlocuirea țiteiului prin apă. Suprafața internă a pilniei 1 și suprafețele filtrante 4 și 5 sînt tratate pentru a prezenta o tensiune de adeziune mai mare față de țitei decât față de apă, prin acoperirea lor cu peliculă foarte fină de compuși organo-silicici solizi (metilclorosilani). Membrana semipermeabilă este chiar patul filtrant 4 de sticlă semiaglomerată, iar stratul de contact capilar cu proba este constituit dintr-o hirtie de filtrare specială 5 cu pori fini, tratată la fel ca pilnia, pentru hidrofobizare.

După aplicarea carotei 6 cu fața plană pe hirtia de contact capilar, ea este reținută de resortul 9, aparat de dopul de cauciuc rezistent la produse petroliere al pilniei. La introducerea apei de dezlocuire, aerul este înlăturat din pilnie printr-un ac de seringă care pătrunde prin dop (v. fig. 2). După dezlocuirea completă a aerului, acul este scos și cauciucul obturează canalul produs la trecerea acului. Membrana de contact capilar, membrana semipermeabilă și partea din aval de filtru a pilniei sînt saturate, respectiv umplute cu țitei pînă la un nivel al tubului de evacuare al pilniei, care poate fi citit pe o scară. După efectuarea probelor (ridicarea diagramei presiune-saturație), carota este supusă unei extracții cu solvent, determinîndu-se țiteiul rezidual, pentru verificare. După natura rocii și a fluidelor, proba poate dura 5—20 zile. Arit durată, cit și necesitatea compensării variației de facies impun lucrul în serie cu un grup numeros de celule de probă.

*) Saturația trebuie să reconstituie cît mai exact situația inițială de zăcămint. În acest scop, calea cea mai indicată este aceea a determinării saturației ireductibile cu apă prin dezlocuire cu țitei sub presiuni relativ înalte, folosind metoda indicată la Cap. V. F. a. cu țitei, în loc de aer.

Experiențele pentru verificare, efectuate asupra unor carote sintetice de sticlă pyrex semiaglomerată și de corindon, care pot fi curățite și prin calcinare, în afară de extracția cu solvenți, în scopul de a determina efectul viscozității țiteiului și al tensiunii interfaciale apă-țitei, au arătat că, pentru cifre de orientare, dezlocuirea poate fi efectuată cu țitei mort și cu saramură artificială. Pentru calcule de proiectare (îndeosebi, în ce privește coeficienții de extracție realizabili) este de preferat ca cifrele astfel obținute să fie corectate prin comparație, printr-un număr mai redus de probe cu țitei cu viscozitatea și cu tensiunea interfacială comparabile cu cele din zăcămint. Tabela 4 reprezintă

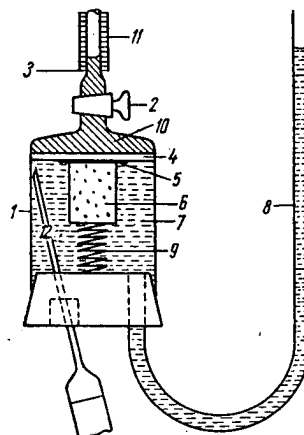


Fig. 2. Reprezentarea schematică a aparatului de studiu dezlocuirii statice cu apă a țiteiului din carotă: 1 — pilnie Buchner de sticlă; 2 — robinet; 3 — semicapilar; 4 — filtru ultrafin de sticlă semiaglomerată; 5 — hirtie specială de filtrare tratată cu metil clorosilan 6 — carota; 7 — apă sărată de dezlocuire; 8 — tub de alimentare cu (7) de la recipientul cu apă și cu azot comprimat; 9 — resort de aliaj inoxidabil; 10 — țitei; 11 — scara de etalonare; 12 — ac de seringă medicinală.

rezultatele obținute în condiții extreme. Pentru reproductibilitate, țiteiul a fost înlocuit cu octan normal. Viscositatea octanului a fost sporită prin adăugarea unui ulei rafinat cu viscozitate mare. Tensiunea interfacială a octanului față de apă a fost redusă prin adaos de trioleat de sorbitol (maximum 0,5%).

Concentrația $[H^+]$ a saramurii a fost reglată prin adaos de soluție tampon $CH_3-COOH + CH_3-COONH_4$, astfel încît nici una dintre substanțele adăugate să nu lase reziduu de calcinare. Încercările au dovedit că:

a) Pentru variații extreme, de la 1 la 7, în valoare relativă, ale tensiunii interfaciale, coeficientul de extracție nu este modificat decît în limita de 10% din valoarea proprie; saturația reziduală este redusă la circa 72% din valoarea inițială, în cazul unui țitei cu viscozitate mică. În cazul unui țitei cu viscozitate mare sînt de așteptat influențe corespunzător mai reduse.

Tabela 4. Rezultatele încercărilor de dezlocuire în condiții variate de viscozitate și de tensiune interfacială pe carote de corindon.

Carota	Volumul porilor V_p , cm ³	Porozitatea m , %	Permeabilitatea absolută k , mD	Tensiunea interfacială țiței-apă σ_{ta} , dyn/cm	Viscozitatea dinamică a țițeiului μ_t , cP	Saturația ireductibilă cu apă $S_{a,i}$, %	Coefficient de extracție, în octan, raportat la octanul inițial ϵ , %	Saturația reziduală, în octan, după dezlocuirea cu apă, S_t , %
1	3,59	24	241	20,0	0,5	22,6	65,2	26,9
1	3,59	24	241	3,8	0,5	24,2	74,5	19,3
1	3,59	24	241	3,8	0,5	19,5	76,0	19,3
2	3,47	23,4	191	20,0	0,5	26,2	74,4	18,9
2	3,47	23,4	191	3,8	0,5	21,7	73,6	20,6
2	3,47	23,3	191	20,0	3,5	23,2	61,0	30,0
2	3,47	23,4	191	20,0	3,5	21,6	76,3	23,3

b) Sporirea viscozității în raportul de 1 la 7 reduce la 82%—95% din valoarea inițială, coeficientul de extracție în țiței cu tensiune interfacială mică. În cazul unui țiței cu tensiune interfacială mare față de apă, sînt de așteptat influențe mai reduse.

Concluziile sînt valabile pentru procese de dezlocuire tip «static» (proces de tipul (a) (v. Cap. V F.a.2), predominant atît în perioada de golire a zăcămîntului sub acțiunea factorilor naturali, cît și în perioada de acțiune a factorilor artificiali prin mecanisme de «dezlocuire» (v. Regimuri Cap. V E.b.). În faza finală a proceselor de golire sub acțiunea

tățile fazelor care curg influențează sensibil procesul respectiv.

2. Dezlocuirea țițeiului prin gaze. Aparatura folosită, asemănătoare celeia pentru dezlocuirea cu apă, se deosebește prin poziția de lucru inversă, datorită, în acest caz, greutateii specifice mai mari a țițeiului decît a fazei dezlocuitoare (v. fig. 3).

Natura gazului dezlocuitor fiind practic

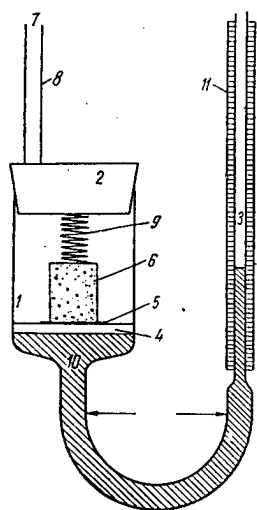


Fig. 3. Reprezentarea schematică a aparatului pentru studiul dezlocuirii statice cu gaze, a țițeiului din carotă; 1 — pînă Buchner de sticlă; 2 — dop de cauciuc; 3 — semicapilar; 4 — filtru ultrafin de sticlă aglomerată; 5 — hirtie specială de filtrare tratată cu metilclorosilan; 6 — carotă; 7 — azot comprimat pentru dezlocuire; 8 — tub de alimentare cu (7); 9 — resort de aliaj inoxidabil; 10 — țiței; 11 — scara de etalonare.

factorilor artificiali, însă, mecanismul «de dezlocuire» este substituit în mare parte prin mecanismul «de antrenare» (vezi și procesele de tip «b», Cap. V. F.a.2), în cazul cărui tensiunile interfaciale și, îndeosebi, viscozi-

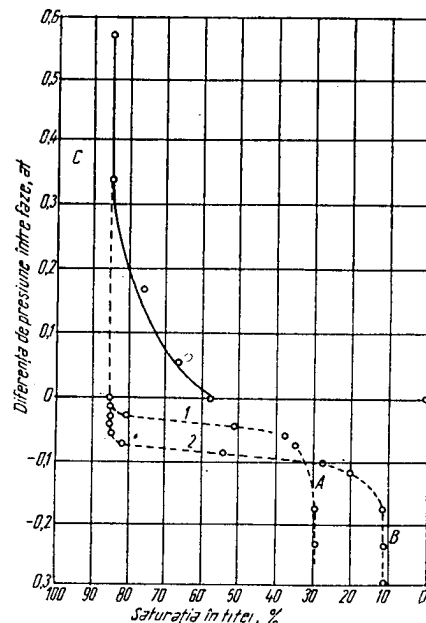


Fig. 4. Curbe experimentale de saturare cu țiței și de desaturare în țiței, prin dezlocuire cu apă și cu gaze, efectuată în regim, «static» (tip a; v. Cap. V F.a.2) asupra unei carote de gresie silicioasă. Adâncime — 1783 m; porozitate — $m = 0,17$; permeabilitate — $k = 0,097$ Darcy: — saturare cu țiței; 1 — desaturare prin apă; 2 — desaturare prin gaze; A — saturația reziduală în țiței la dezlocuirea prin apă; B — saturația reziduală în țiței la dezlocuirea prin gaze; C — saturația ireductibilă în apă.

indiferentă (în limita proceselor de intrare în soluție și de modificare a tensiunilor interfaciale), se folosește azotul, care este relativ ieftin și, din punct de vedere chimic, inactiv

față de fluidele și de aparatura folosită. Operația este condusă în mod analog cu aceea de dezlocuire cu apă, introducându-se azotul sub presiuni din ce în ce mai mari, notându-se volumele de țiței împinse prin dezlocuire din carotă în capilarul 3 și reprezentându-se relația saturație în țiței — diferență de presiune capilară între faze care echilibrează diferența de presiune aplicată. Se obțin, astfel, curbe de felul celor tipice reprezentate în fig. 4 și 5.

Indicațiile acestor curbe sînt deosebit de utile, deși nu reprezintă exact comportarea rocii în procesul de golire.

Coefficienții de extracție astfel obținuți constituie limite superioare pentru cei efectiv atinși în zăcămint, din cauza imperfecțiunilor procesului de dezlocuire datorite fenomenelor de micro și de macrocanalizare. La scara de detaliu, enclavale de rocă colectoare neafectate de procesul de dezlocuire se datoresc neomogenității rocii, iar la scară mare, imperfecțiunii sistemului de acoperire a zăcămintului cu sonde.

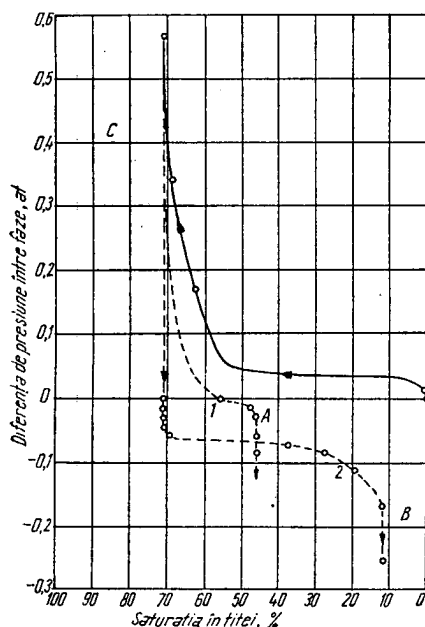


Fig. 5. Curbe experimentale de saturație cu țiței și de desaturare în țiței prin dezlocuire cu apă și cu gaze, efectuată în regim 'static' (tip a, v. Cap. V, F.a.2.) asupra unei carote de gresie argilooasă. Adâncime — 1683 m; porozitate — $m = 0,258$; permeabilitate — $k = 0,834$ Darcy: — saturație cu țiței; 1 — desaturare prin apă; 2 — desaturare prin gaze. A — saturația reziduală în țiței la dezlocuirea prin apă; B — saturația reziduală în țiței la dezlocuirea prin gaze; C — saturația ireductibilă în apă,

în cazul dezlocuirii cu apă, ei reprezintă relativ fidel pe cei efectivi din zăcămint, pe cînd în cazul dezlocuirii cu gaze, din cauza diferenței mari de viscozitate dintre țiței și gaze, canalizările sînt mult mai active, respectiv

procesul din laborator nu mai poate fi condus în zăcămint, pînă la faza finală, iar coeficienții de extracție realizați prin dezlocuire prin gaze sînt nu numai inferiori celor obținuți în laborator, ci și inferiori celor realizați prin dezlocuire cu apă. Regimul de dezlocuire static este alterat, în general, mai timpuriu, în cazul dezlocuirii cu gaze, iar cel dinamic devine preponderent și deseori neeconomic.

Rezultatele cercetărilor de desaturare prin dezlocuire sînt influențate în mare măsură și de inexactitatea realizării situației originare de saturație a carotei.

d. Dezlocuirea și antrenarea țițeiului de către apă și de către gaze prin procese de tip « dinamic »

Fenomenele de golire prin procese de tip « dinamic », prin curgerea simultană a ambelor fluide, țiței și fluidul motor, relativ ușor reproductibile în laborator și avînd loc în conformitate cu legile curgerii polifazice (v. Cap. V F. a), sînt mai puțin controlabile în zăcămint. Corespondența fenomenelor din zăcămint cu cele din laborator este alterată de neuniformitatea saturațiilor și de neomogenitatea litologică a rocii colectoare.

1. Dezlocuirea și antrenarea cu apă a țițeiului din roca colectoare cuprinde două etape: o etapă în care, deși în rocă curgerea este bifazică, fluidul colectat în punctul aval al curgerii este format exclusiv din țiței și o etapă în care, după « răzbirea » apei în sondă (respectiv canalul central al carotei, în experiențele de laborator), are loc în mod vizibil o curgere bifazică; pentru scurte perioade de timp, aceasta poate fi considerată ca stabilizată. Din raportul debitelor de țiței și de apă (ecuațiile 13, 14 și 15, Cap V), este determinat coeficientul de impurificare C_a , cu relația

$$C_a' = \frac{1}{1 + \frac{\mu_a \cdot b_a}{\mu_t \cdot b_t} \cdot \frac{k_t}{k_a}} = \frac{1}{1 + M \frac{k_t}{k_a}} \quad (4)$$

în care $M = \mu_a \cdot b_a / \mu_t \cdot b$; k_a și k_t sînt permeabilitățile relative, definite prin ecuațiile 13, respectiv 19 și 20, Cap V, ca funcții de saturația în apă; S_a este considerată variabilă independentă. Eliminînd această variabilă dintre relația (4) și ecuația de definiție a coeficientului de extracție

$$\varepsilon = \frac{S_a - S_a'}{1 - S_a'} \quad (5)$$

se obține o funcție $\varepsilon = f(C_a)$, reprezentată grafic în fig. 6 pentru diferite valori ale parametrului M , cuprinse între 1 și 1/16.

Această funcție este relativ utilă în condițiile de laborator, dar are o valoare de strictă

orientare în interpretarea proceselor din zăcămint. În afară de efectul neregularităților curgerii, datorite neomogenității litologice a rocilor, și de efectul deformării suprafeței de separație apă-țitei (v. Cap. II. H. a.) care condiționează o invazie neregulată a apei, ea este bazată pe ecuațiile (14) și (15) din (Cap. V) rezultate din integrarea unei ecuații diferențiale de curgere între limitele de plecare și de sosire ale fluidului respectiv, la care permeabilitățile efective, κ sînt considerate constante pe tot parcursul. În realitate (v. (19) și (20) Cap. V) ele sînt funcții de saturațiile respective, care nu sînt constante pe acest parcurs. Cu toată aproximația nesatisfăcătoare rezultată din aceste cauze (fig. 6) această funcție este folosită orientativ, îndeosebi, în procesele de spălare-antrenare, ținîndu-se mai mult sau mai puțin seama de suprafețele de zăcămint corespunzătoare zonelor de diferite saturații.

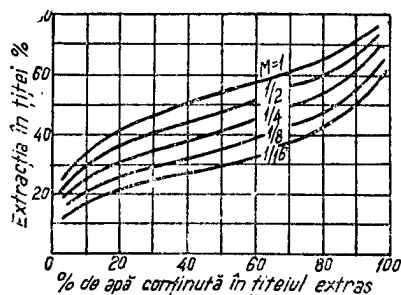


Fig. 6. Relația dintre coeficientul de extracție, ϵ , și coeficientul de impurificare, C .

În experiențele de laborator, din cauza distanțelor de parcurs mici, probabilitatea variației saturației este mai redusă și legea reprezentată în fig. 6 este relativ satisfăcută. Deși neconcludente din punct de vedere cantitativ, din motivele expuse, experiențele sînt preferabile, deoarece țin seama mai exact de particularitățile rocii (îndeosebi, omogenitate din punctul de vedere al permeabilității efective și tendința de a favoriza propagările neregulate, limbi, conuri etc.) și de fenomenele molecular-superficiale. Ele sînt efectuate pe carote perforate central, saturate la situația de zăcămint, în curgere radială centripetă (pentru minimizarea efectelor de colmatare prin dezagregarea probei).

Ele dau, în general, valoarea-limită superioară a coeficientului de extracție care s-ar putea atinge în cele mai favorabile condiții în zăcămint (regularitate a curgerii și valori ridicate ale gradientilor de presiune). Se realizează, în general, delocuirea și spălarea cu apă de zăcămint sau cu apa disponibilă pentru injecție în șantier. Tendința de a favoriza formarea conurilor este studiată printr-o tehnică deosebită, care constă în a injecta și țitei și apă (v. fig. 7), nivelul acestora fiind menținut constant în celula exterioară de injecție, la

mijlocul înălțimii probei. După cum fluidul colectat în canalul central este evacuat pe la partea superioară sau pe la cea inferioară, se observă formarea unei suprafețe de demarcație conice cu vârful în sus, respectiv în jos, iar

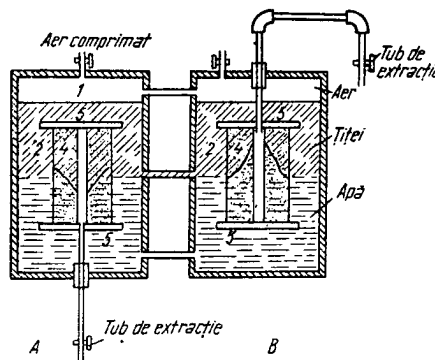


Fig. 7. Reprezentarea schematică a aparatului pentru studiul spălării pe carote, varianta curgerii bifazice pentru studiul neregularității scurgerii: A — cazul evacuării inferioare; B — cazul evacuării superioare; 1 — aer sub presiune; 2 — țitei; 3 — apă; 4 — carota; 5 — discurile dispozitivului de fixare a probei (v. fig. 8).

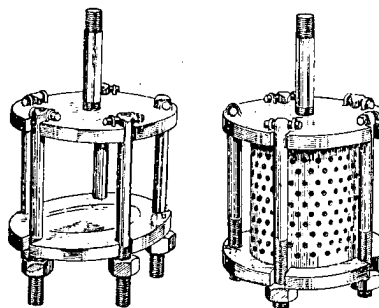


Fig. 8. Dispozitive de fixare a carotelor pentru studiul spălării radiale: a — pentru roci cimentate; b — pentru nisipuri necimentate.



Fig. 9. Secțiune prin carotă, la a cărei spălare s-a produs o pilnie (con de apă). Nisip slab cimentat, spălat circa 200 ore.

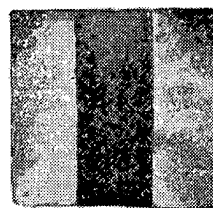


Fig. 10. Secțiune prin carotă, la a cărei spălare s-a produs o pilnie (con de apă). Calcar oolitic.

panta medie a conului pentru un același gradient de presiune aplicat constituie un parametru caracteristic rocii și fluidelor, de favorizare a propagării neregulate a apei (v. fig. 9).

Aceiași aparatură permite studiul efectului adaosurilor de agenți reductori ai tensiunii interfaciale și ai unghiului de contact. Speranțele de realizare a unor coeficienți de extracție foarte ridicați în zăcămint, asemănători celor obținuți în laborator prin adăugare în apa de

cu apă, iar de la $t = 72$ ore la $t = 90$ ore, curba conținutului de țiței sporit, extras în fluidul colectat în canalul central al carotei în urma spălării cu apă distilată conținând 0,056% oleat de sodiu.

Se recomandă în același scop folosirea de di-

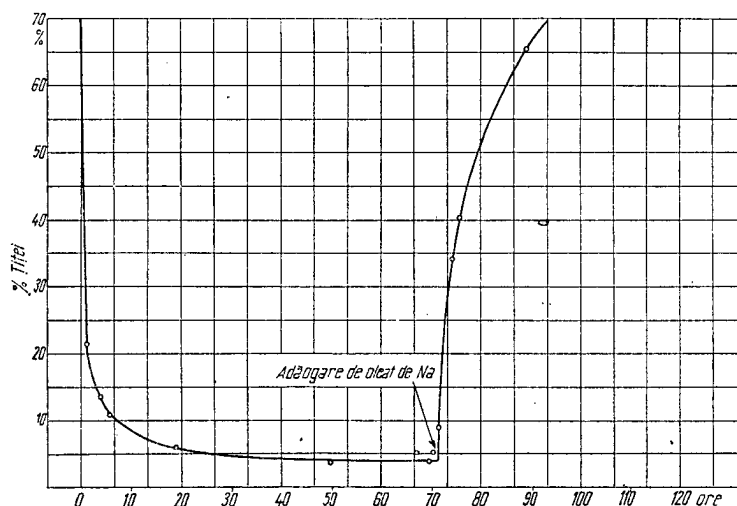


Fig. 11. Variația conținutului în țiței din fluidul extras prin spălare, înainte și după adăugarea a circa 0,05% oleat de sodiu în apa de spălare.

spălare a unor reactivi superficiali activi (detergenți), nu s-au realizat încă practic, din cauza



Fig. 12. Secțiune printr-o probă de nisip fin necimentat, supus spălării cu apă. Din cauza evacuării apei pe la partea inferioară a probei, s-a produs o pilnie (con) de țiței.

lipsei unui reactiv satisfăcător (activ, ieftin, care să nu fie adsorbit repede la suprafața rocii și astfel inactivat și care să nu precipite cu ionii de Ca sau cu alți ioni din apele de zăcămint). Încercarea lor este indicată îndeosebi în cazul rocilor silicioase, fără material argilos sau calcaros, cu granulometrie relativ fină. Fig. 11 reprezintă, între timpul $t = 0$ și $t = 70$ ore, curba de stabilizare a procentului de țiței prin spălare

*) La data elaborării prezentei lucrări. Ulterior s-au obținut importante progrese.

feriți detergenți sintetici, sulfonați alcalini, nafenati alcalini, silicat de sodiu, fenol, hidrat de sodiu etc. Prezența ionilor de Ca^{++} în apa de zăcămint constituie o serioasă contraindicație și orice încercare de activare a spălării cu astfel de reactivi în zăcămint trebuie precedată de cercetări experimentale efectuate asupra unor carote din stratul respectiv și cu apă din zăcămintul respectiv, chiar dacă spălarea se efectuează cu apă mai satisfăcătoare, deoarece riscul colmatării stratului cu sărurile respective de Ca fiind important, trebuie evitat.

2. Dezlocuirea și antrenarea cu gaze. În cazul curgerii bifazice gaze-țiței, ecuația echivalentă ecuației (4) este

$$Q_{cr} = r + \frac{b\mu_t}{B\mu_g} \cdot \frac{k_g}{k_t} \quad (6)$$

unde Q_{cr} este rația curentă gaze-țiței, în $\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{m}^3$

Stabilirea unei relații suficient de exacte între Q_{cr} și ϵ în mod analog cu aceea dintre C și ϵ (fig. 6) este posibilă, dar valoarea ei este mai degrabă de orientare decît de aplicație practică, din cauza nepreciziei acesteia.

Aplicarea directă a ecuațiilor de curgere eterogene în mod explicit, în cazul injectării de gaze, dă pentru raportul dintre debitul net de gaze extras și debitul de țiței:

$$R = \left[r + \frac{b\mu_t}{B\mu_g} \cdot \frac{k_g}{k_t} \right] (1 - \theta), \quad (7)$$

unde

$R = G_{cr} (1 - \theta)$ este rația curentă netă de gaze în $\text{m}^3\text{N}/\text{m}^3$, raportul dintre diferența dintre gazele extrase și cele injectate, pe de o parte și țițeiul extras, pe de altă parte;

θ — fracțiunea din gazele extrase, reintrodusă în zăcămint prin injectare (raport de debite curente), în $\text{m}^3\text{N}/\text{m}^3$,

iar pentru variația saturației medii cu presiunea dS_t/dP :

$$\frac{dS_t}{dP} \left[1 + \frac{\mu_t}{\mu_g} \left(\frac{k_g}{k_t} - \theta G_{cr} \frac{B\mu_g}{G\mu_t} \right) \right] = S_t \lambda(P) + (1 - S_a - S_t) \varphi(P) + S_t \eta(P) \times \left(\frac{k_g}{k_t} - \theta G_{cr} \frac{\mu_g B}{\mu_t b} \right) + a \left[b \bar{S}_{ti} \lambda(P) + (1 - S_a - b \bar{S}_{ti}) \cdot \varepsilon(P) - \bar{S}_{ti} \frac{db}{dP} \right], \quad (8)$$

unde se folosesc aceleași notații ca în relația (58), Cap. V).

Analizând comportarea unui zăcămint cu aceleași caracteristici, cu $a = 0$, fără zonă inițială de gaze libere, respectiv cu o bogată zonă inițială de gaze libere, $a = 0,5$, separînd variabilele și eliminînd pe aceeași cale grafică variabilele auxiliare, se obține comportarea globală a zăcămintului, indicată în fig. 13.

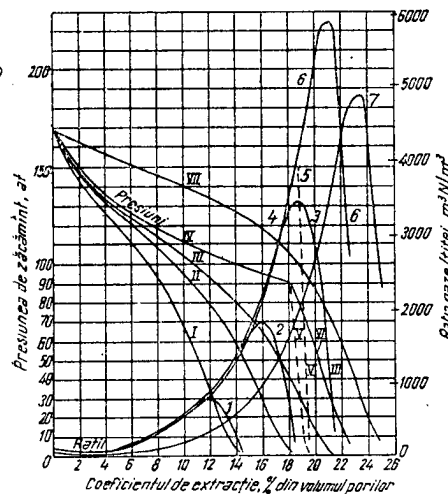


Fig. 13. Comportarea globală, determinată analitic, a zăcămintului analizat în fig. 62 Cap. V, în cazul unei injectări de gaze pentru menținerea parțială a presiunii la diferite grade, θ de reintroducere a gazelor în zăcămint: Curba I de variație a presiunii, 1 de variație a rației, pentru $\theta = 0$; Curba II de variație a presiunii, 2 de variație a rației, pentru $\theta = 0,6$; Curba III de variație a presiunii, 3 de variație a rației, pentru $\theta = 0,8$; Curba IV de variație a presiunii, 4 de variație a rației, pentru $\theta = 1$ până la $Q_c = 3550 \text{ m}^3\text{N}/\text{m}^3$; Curbele V și 5, continuarea curbelor IV și 4 cu $\theta = 0$; Curbele VI și 6, continuarea curbelor IV și 4 cu $\theta = 0,8$; Curba VII de variație a presiunii în cazul cînd zăcămintul posedă o importantă zonă inițială de gaze libere ($a = 0,5$) și se reinjectează cu $\theta = 0,8$). Curba 7 de variație a rației de gaze (a se dubla valorile citite pe scara ordonatelor — valabilă pentru celelalte curbe 1...6 — corespunzătoare cazului VII).

În ce privește presiunea, efectul reinjectării este vădit ca și în privința coeficientului de extracție realizat între presiunea inițială și o aceeași presiune finală, de exemplu: 7 ata. În ce privește rația brută de gaze extrase, influența asupra ramurii crescătoare a curbei este foarte redusă și chiar aparent paradoxală: la coeficienți de reinjectare, θ , mai mari corespund, cel puțin pe prima parte a ramurii ascendente, creșteri mai mici ale rației brute de producție. Explicația constă în faptul că:

a) coeficienții de reinjectare mai mari asigură presiuni mai mari și, deci, raporturi k_g/k_t mai favorabile, pentru un același stadiu de golire, ε ; b) sporirea coeficienților de reinjectare nu echivalează cu o sporire proporțională a cantității absolute de gaze injectate, deoarece cantitatea absolută de gaze extrase este mai mică.

În porțiunea finală a ramurii ascendente a curbei de rație, cum și în cea descendentă, influența coeficientului de reinjectare constă în a spori mult rațiile brute de producție și în a întârzia apariția ramurii descendente.

Curbele 7, VII, de analiză a comportării aceluiași zăcămint, în ipoteza unei zone inițiale de gaze libere cu dimensiuni relativ mari ($a = 0,5$), indică acțiunea de menținere a presiunii în condiții mai favorabile, a expansiunii gazelor libere.

În analiza dată, segregatia gravitațională a gazelor din țiței a fost considerată complet absentă. În caz de prezență, efectul ei constă în a deplasa curbele de comportare de la poziția acestora din cazul fără zonă de gaze, către poziția curbei din cazul cu zonă de gaze. Pe de altă parte, însă, reinjectarea gazelor în zăcămint este începută rareori odată cu exploatarea lui. În cel mai favorabil caz, ea este începută după un studiu sumar și după o perioadă de exploatare, în care se determină extensiunea zonei efectiv productive a zăcămintului și principalii săi parametri. Efectul întâzierii începerii reinjectării, analizat cu relația (8) în aceleași condiții, este dat în fig. 14, 15, 16 și 17, în cazul reinjectării a 60%, respectiv a 80% din gazele extrase. Din analiză rezultă că în toate cazurile, începutului reinjectării îi corespunde o reducere a declinului presiunii. Asupra rației curente de producție, însă, efectul imediat este aproape imperceptibil la scara din fig. 15 și 17. Efectul ulterior al începerii reinjectării în faza relativ timpurie a exploatării, înainte de atingerea maximumului rației de producție, constă într-o sporire a

valorii acestui maxim și în întârzierea apariției sale. Din analiza fig. 14 și 16 rezultă că întârzierea începerii reinjectării ar avea o influență relativ redusă asupra coeficientului de extracție realizabil; din examinarea fig. 18 rezultă că, în cazul zăcămintului particular analizat, întârzierea începerii reinjectării, din momentul inițial ($P = 170$ ata) până în momentul cînd

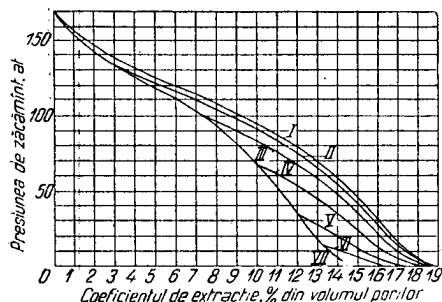


Fig. 14. Comportarea de presiune în cazul exploatării cu reinjectarea întârziată a 60% din gazele extrase (debit). Zăcămintul din fig. 62 Cap. V: Curba I — injectare din momentul cînd presiunea de zăcămint este de 170 at (inițial); Curba II — injectare din momentul cînd presiunea a scăzut la 80% din cea inițială, 136 at; Curba III — injectare din momentul cînd presiunea a scăzut la 60% din cea inițială, 102 at; Curba IV — injectare din momentul cînd presiunea a scăzut la 40% din cea inițială, 68 at; Curba V — injectare din momentul cînd presiunea a scăzut la 20% din cea inițială, 34 at; Curba VI — injectare din momentul cînd presiunea a scăzut la 8% din cea inițială, 13,6 at; Curba VII — exploatarea fără reinjectare.

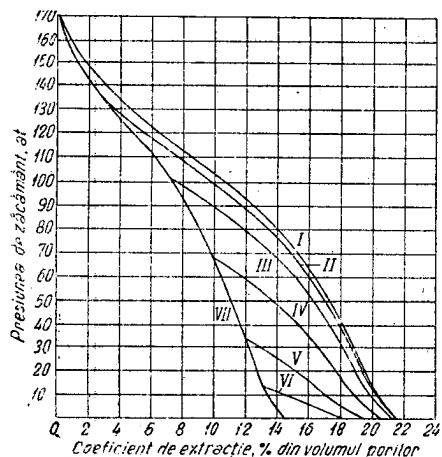


Fig. 15. Comportarea de presiune în cazul exploatării cu reinjectarea întârziată a 80% din gazele extrase. Zăcămintul din fig. 62 Cap. V: Curba I — injectare din momentul cînd presiunea de zăcămint este de 170 at (inițial); Curba II — injectare din momentul cînd presiunea a scăzut la 80% din cea inițială — 136 at; Curba III — injectare din momentul cînd presiunea a scăzut la 60% din cea inițială — 102 at; Curba IV — injectare din momentul cînd presiunea a scăzut la 40% din cea inițială — 68 at; Curba V — injectare din momentul cînd presiunea a scăzut la 20% din cea inițială — 34 at; Curba VI — injectare din momentul cînd presiunea a scăzut la 8% din cea inițială — 13,6 at; Curba VII — exploatarea fără injectare.

presiunea medie a zăcămintului a atins 70 ata, provoacă o pierdere de coeficient de extracție de 1,1% (din spațiul de pori) în cazul reinjec-

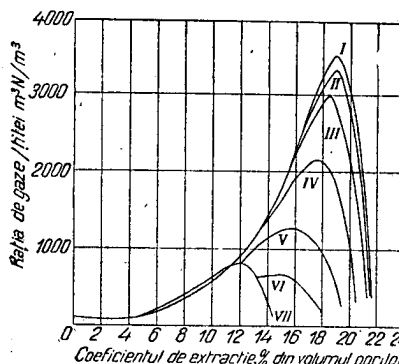


Fig. 16. Comportarea de rație curentă în cazul exploatării cu reinjectarea întârziată, a 60% din gazele extrase, zăcămintul din fig. 62 Cap. V: Curba I de variație a rației în cazul că reinjectarea este începută în momentul cînd presiunea de zăcămint are valoarea 170 at (chiar în momentul inițial); Curba II de variație a rației în cazul că reinjectarea este începută în momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut la 80% din valoarea inițială, la 136 at; Curba III de variație a rației în cazul că reinjectarea este începută în momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut la 60% din valoarea inițială, la 102 at; Curba IV de variație a rației în cazul că reinjectarea este începută în momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut la 40% din valoarea inițială, la 68 at; Curba V de variație a rației în cazul cînd reinjectarea este începută în momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut la 20% din valoarea inițială, la 34 at; Curba VI de variație în cazul că reinjectarea este începută în momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut la 10% din valoarea inițială, la 13,6 at; Curba VII, în cazul exploatării fără reinjectare.

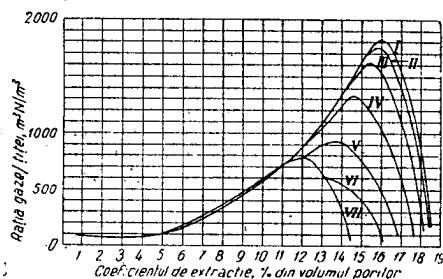


Fig. 17. Comportarea de rație curentă în cazul exploatării cu reinjectarea întârziată a 80% din gazele extrase zăcămintul din fig. 62: Curba I, de variație a rației în cazul că reinjectarea este începută în momentul cînd presiunea de zăcămint are valoarea de 170 at (momentul inițial); Curba II, de variație a rației în cazul că reinjectarea este începută în momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut la 136 at (la 80% din cea inițială); Curba III, de variație a rației în cazul că reinjectarea este începută în momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut la 102 at (la 60% din cea inițială); Curba IV, de variație a rației în cazul că reinjectarea este începută în momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut la 68 at (la 40% din cea inițială); Curba V, de variație a rației în cazul cînd reinjectarea este începută în momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut la 34 at (la 20% din cea inițială); Curba VI, de variație a rației în cazul cînd reinjectarea este începută în momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut la 17 at (la 10% din cea inițială); Curba VII, de variație a rației în cazul exploatării fără reinjectare.

tării a 80% din gazele extrase, respectiv de 0,9%, în cazul reinjectării a 60% din gazele extrase. Concluzia că reinjectarea ar putea fi întârziată fără pierderi importante nu este însă justă, deoarece: a) procentele indicate nu se raportează la însuși coeficientul de extracție, ci la o mărime mult superioară lui (volumul porilor) și b) metoda de analiză folosită nu ține seamă de neuniformitățile de distribuție a saturației, care intervin cu efecte uneori importante (canalizări).

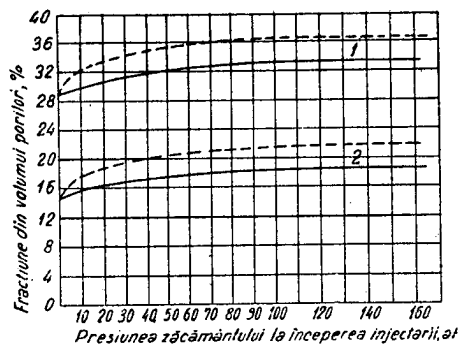


Fig. 18. Variația coeficientului final de extracție în țitei cu întârzierea începerii reinjectării în zăcămint a gazelor extrase, exprimată prin presiunea de zăcămint la care începe reinjectarea. Curbele continue corespund unui $\theta = 0,6$, iar cele întrerupte, unui $\theta = 0,8$. Curbele 1 se referă la volumul de pori golit, față de volumul total de pori. Curbele 2 se referă la volumul de țitei degazeificat extras, față de volumul total de pori.

Fenomenele de distribuție neuniformă a saturației (formări de adevărate canale de gaze în loc de limbi-conuri) sînt mult mai accentuate decît în cazul apei, din cauza diferenței de viscozitate dintre gaze și țitei mult mai mare decît aceea dintre apă și țitei. Variația, în funcție de presiune, a raportului $\frac{b_i \mu_i}{B \mu_g}$ mult

mai accentuată decît aceea a raportului $\frac{b_a \mu_a}{b_i \mu_i}$

face de asemenea ca, la integrarea ecuațiilor de aflus pe fiecare fază, acești factori să nu mai poată fi considerați constanți. Efectul factorilor perturbanți reiese din fig. 19 și 20 în care este reprezentată variația raportului k_g/k_t , dedus pe baza relației (6) din comportarea unui grup de zăcămint, în comparație cu variația aceluiași raport k_g/k_t , determinat experimental asupra unor carote din zăcămintele respective. Din cauzele perturbatoare menționate, valorile aparente ale raportului k_g/k_t sînt pînă la de 10 ori mai mari în comportarea zăcămintelor decît cele rezultate în comportarea din carote.

Pentru clarificarea problemei la scara zăcămintului, se dispune de metoda analizei com-

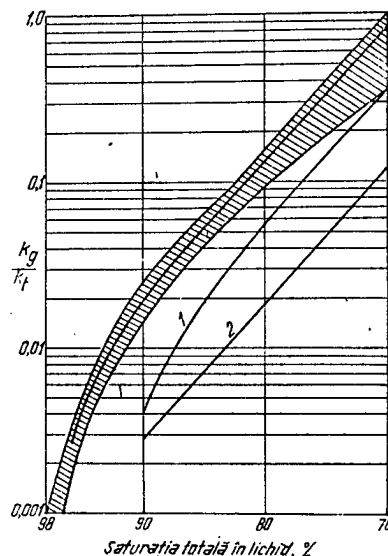


Fig. 19. Comparatia raportului permeabilităților relative față de gaze, respectiv de țitei, a unor roce calcaroase, comportarea de zăcămint față de aceea din carotă: zona hașurată — comportarea de zăcămint (inclusiv curba medie); curbele 1—2 — curbe care încadrează rezultatele de laborator obținute pe carote din zăcămintele respective.

portării pe baza ecuațiilor de bilanț material (v. Cap. VI H.), mai puțin afectată, în acest caz, de neuniformitatea distribuției fazelor în zăcămint.

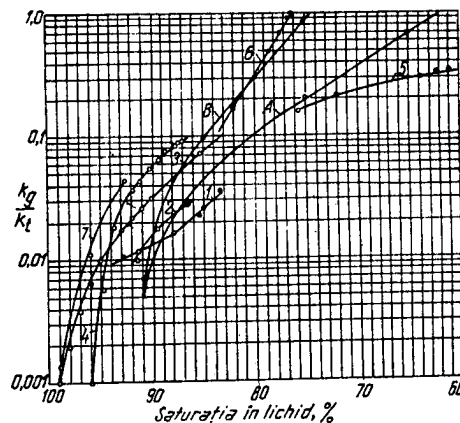


Fig. 20. Comparatia raportului permeabilităților relative față de gaze, respectiv față de țitei, a unor roci colectoare diferite: 1, 2, 3, 4 — calcare și dolomite; 5—6 — nisipuri; A — nisip cimentat; B — gresie cimentată. } comportare experimentală în laborator.

Experiențe de laborator pe carote de mare lungime în raport cu secțiunea ($l = 12 \dots 15$ ori diametrul) au dovedit că relația, mult mai interesantă din punctul de vedere al controlului operațiilor de spălare cu gaze, dintre saturația reziduală în țiței și volumul cumu-

Cu toată reproductibilitatea lor remarcabilă, curbele nefiind perfect rectilinii, se recomandă determinarea lor experimentală și folosirea lor îndeosebi în gama saturațiilor reduse, respectiv a volumelor mari de gaze, în stadiul relativ înaintat al spălării. Valoarea tehnico-

Fig. 21. Variația saturației în țiței a unei carote lungi (cu lungimea de 660 mm și cu diametrul de 62 mm) de gresie silicioasă, cu ciment parțial argilos, la spălarea cu gaze, în funcție de volumul cumulativ de gaze trecut prin probă, exprimat în multipli ai volumului de pori:

I — pentru țiței de $\mu_t = 2,24$ cP, la $+32^\circ\text{C}$; II — pentru țiței de $\mu_t = 4,77$ cP la temperatura probei; III — pentru țiței de $\mu_t = 7,55$ cP la temperatura probei; $k = 0,013$ darcy. Presiunea de ieșire = 1 ata. Presiunea de intrare = 1,658 ata.

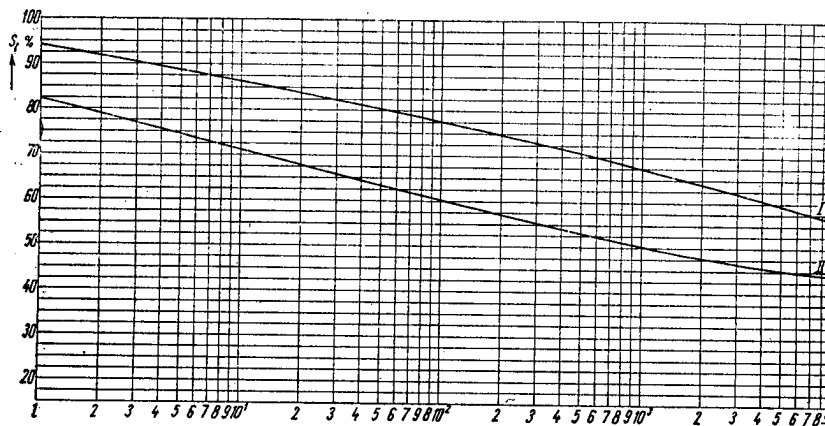
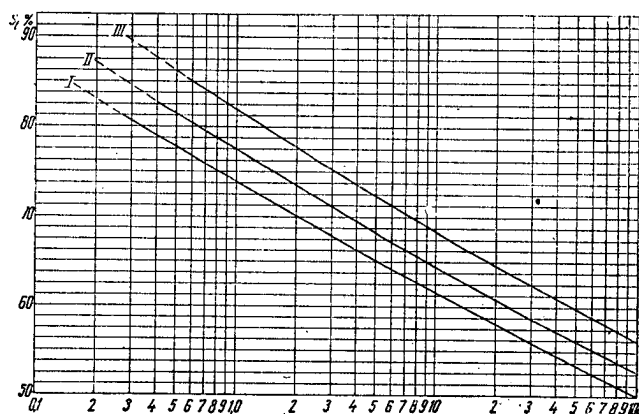


Fig. 22. Variația saturației în țiței a unei carote lungi (cu lungimea de 915 mm și cu diametrul de 62 mm) de gresie silicioasă cu ciment parțial argilos, la spălarea cu gaze, în funcție de volumul cumulativ de gaze trecut prin probă, exprimat în multipli ai volumului de pori:

I — pentru țiței de $\mu_t = 82,6$ cP, la $+32^\circ\text{C}$
II — pentru țiței de $\mu_t = 2,24$ cP, la $+32^\circ\text{C}$ } (temperatura probei)

$k = 0,800$ darcy. Presiunea de ieșire = 1,00 ata. Presiunea de intrare = 2,00 ata.

lativ de gaze trecute prin probă (exprimat în multipli ai volumului de pori) poate fi exprimată în coordonate semilogaritmice printr-o curbă aproape rectilinie (v. fig. 21, 22 și 23).

Parametrii caracteristici ai curbelor (drep-telor) respective (panta și urma pe axa saturațiilor) depind de permeabilitatea absolută a rocii și de viscozitatea fazei fluide (teoretic, de raportul μ_t/μ_g , dar μ_g variază relativ puțin) și trebuie determinați în fiecare caz particular.

economică a curbelor de această natură este interesantă în ce privește determinarea limitei economice a spălării cu gaze. Pentru rezolvarea problemei economice sînt mai utile relațiile dintre saturația în țiței și rațiile instantanee, finale, de gaze (v. fig. 24 și 25).

Curbele din fig. 24 și 25 indică același efect al viscozității și al permeabilității absolute și aceeași creștere aproape liniară a logaritmului rației de gaze, la scăderea saturației în țiței.

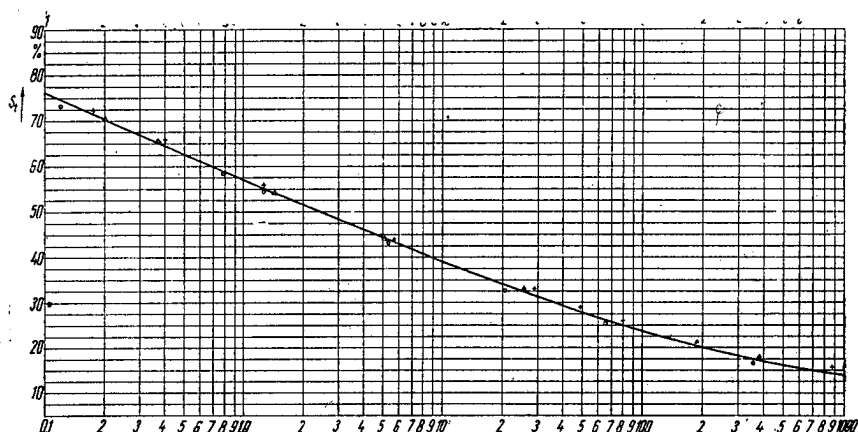


Fig. 23. Variația saturației în țiței a unor probe lungi (cu lungimea de 660 mm, 1423 mm și 2690 mm și cu diametrul de 62 mm) de nisip necimentat, la spălarea cu gaze, în funcție de volumul cumulativ de gaze trecut prin probă, exprimat în multipli ai volumului de pori. 1 — Δ — proba de 660 mm; 2 — + — proba de 1423 mm; 3 — o — proba de 2690 mm (permeabilitatea absolută $k \cong 2,0$ darcy. Presiunea de intrare — 1... 1,833 ata, 2... 2,787 ata, 3... 4,400 ata; Viscositatea țițeiului $\mu_t = 2,24$ cP; temperatura probei $t^\circ = +32^\circ\text{C}$; presiunea de ieșire 1, 2, 3... 1 ata; gradient mediu de presiune aplicat 1, 2, 3... 0,01263 at/cm.

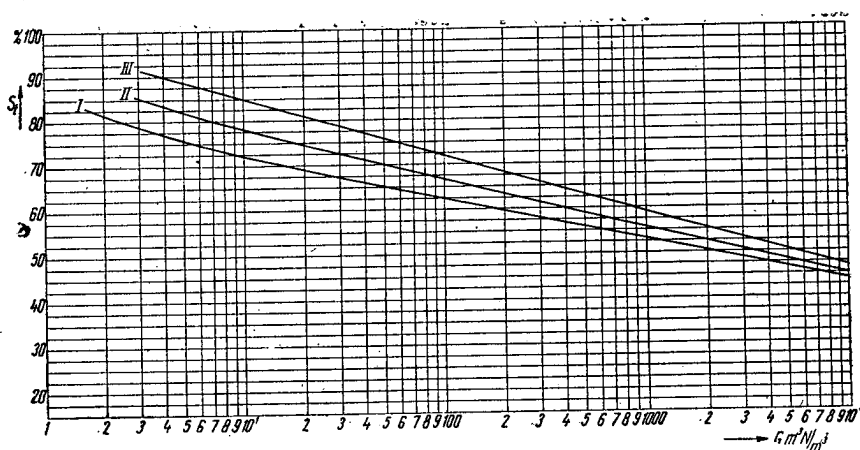


Fig. 24. Variația saturației în țiței a unei carote lungi ($l = 660$ mm, diametrul = 62 mm) de gresie silicioasă cu ciment parțial argilos, la spălarea cu gaze, în funcție de rația de gaze din momentul final: I — pentru țiței de $\mu_t = 2,24$ cP, la 32°C ; II — pentru țiței de $\mu_t = 4,77$ cP (temperatura probei); III — pentru țiței de $\mu_t = 7,55$ cP (temperatura probei); $k = 0,013$ darcy; presiunea la ieșire = 1 ata; presiunea la intrare = 1,658 ata.

În carotele relativ lungi cercetate, efectele de canalizare sînt probabil mult stînjinite. În condițiile de strat, canalizările se produc chiar în cazul unei exploatare relativ lente a zăcămîntului. Permeabilitatea zăcămîntului prezintă de obicei o distribuție stratificată și din această cauză stratele cu permeabilitate absolută mare, devin curînd canale de gaze. Abatererea de la comportarea indicată de curbele reprezentate în fig. 21—25, deși teoretic importantă, este compensată uneori, în oarecare măsură, de curgerea în direcție normală pe stratificație.

Din cauza diferenței de permeabilitate se produc, mai ales în regiunea de aval a curgerii în strat, presiuni reduse mai mici în subdiviziunile mai permeabile ale stratului decît în cele mai puțin permeabile. Sub influența acestor diferențe de presiune se produce o curgere din subdiviziunile mai puțin permeabile, mai puțin drenate, deci, cu saturație în țitei mai mare, către cele mai permeabile. În condiții relativ favorabile (lipsa unor intercalații impermeabile), debitul acestor curgeri poate atinge valori importante din punct de vedere

de curgere realizate în carote și cele din zăcămînt. În condiții favorabile (v. Cap. V G. și I), compensarea este îmbunătățită și de segregarea gravitațională a gazelor din țitei.

B. ANALIZA PROCESULUI DE GOLIRE A ZĂCĂMÎNTULUI, ÎN REGIMURILE MODIFICATE PRIN INTERVENȚIA FACTORILOR ARTIFICIALI, CU ECUAȚIILE DE BILANȚ MATERIAL

a. Regimul cu împingere de apă

Regimul cu împingere de apă întreținut artificial, poate fi analizat cu ecuațiile (44) sau (45) Cap. V, în care W reprezintă volumul total de apă pătrunsă în zona petroliferă a zăcămîntului, atît cea pătrunsă din zona acviferă a zăcămîntului, cît și cea injectată prin sonde. Pentru analiza mai exactă a regimului pur, la presiuni superioare presiunii P_f de început de fierbere a țiteiului, se ține seama

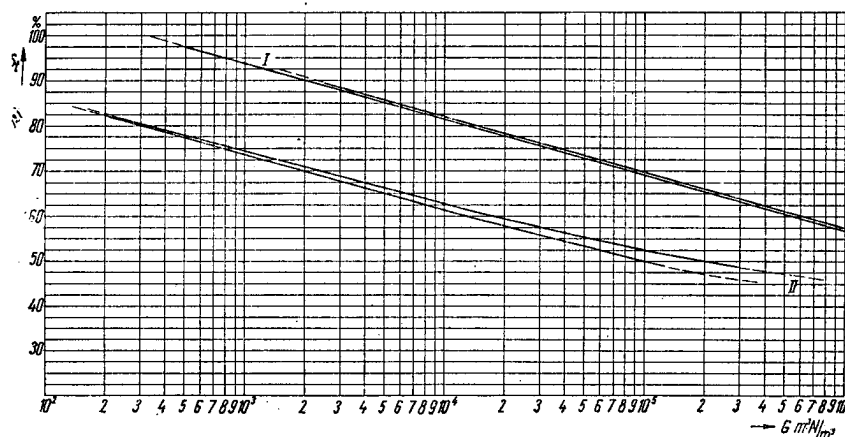


Fig. 25. Variația saturației în țitei a unei carote lungi ($l = 915$ mm, diametrul = 62 mm) de gresie silicioasă cu ciment parțial argilos, la spălarea cu gaze, în funcție de rația de gaze din momentul final: I — pentru țitei de $\mu_t = 82,6$ cP la $+32^\circ\text{C}$ (temperatura probei); II — pentru țitei de $\mu_t = 2,24$ cP la $+32^\circ\text{C}$ (temperatura probei); $k = 0,800$ darcy; presiunea de ieșire = 1,00 ata; presiunea de intrare = 2,00 ata.

economic, de exemplu, de ordinul $9 \text{ m}^3/\text{zi} \times \times$ hectar, pentru cazul unei permeabilități efective medii a celor două subdiviziuni respective ale stratului, $k_t = 25$ mD, între care s-a stabilit un gradient mediu normal de presiune, cu componenta după normală la stratificație, de 0,1 at/m, în cazul unui țitei cu viscozitate relativ ridicată, $\mu_t = 2,5$ cP, în condițiile de strat. Chiar în cazul extrem al unei permeabilități efective corespunzătoare de circa 2,5 mD, debitul rezultat, de ordinul $1 \text{ m}^3/\text{zi} \times$ hectar, nu este neglijabil, ceea ce compensează sensibil deosebirea dintre condițiile

și de apă asociată a zonei petrolifere, care, deși nu participă la curgere, prezintă totuși o variație de volum, datorită scăderii presiunii medii a zonei petrolifere de la presiunea inițială P_i la presiunea $P > P_f$. Presiunea-limită finală a procesului nefiind 1 ata, ca în cazul ecuațiilor (44) și (45), ci P_f , volumele N_t , de țitei inițial aflat în zona petroliferă, x_t , de țitei extras, N_a , de apă asociată aflată în zona petroliferă a zăcămîntului și W , de apă injectată, respectiv w , de apă extrasă eventual împreună cu țiteiul, sînt exprimate în m^3 măsurați la presiunea finală P_f . Admițînd în domeniul

de presiuni $P_i \dots P_f$ și pentru țiței o lege de variație elastică a volumului acestuia în funcție de presiune, de forma ecuației (45, Cap III) cu exponentul $(-b_0)$ considerat nul pentru simplificare, bilanțul volumetric al extracției țițeiului este

$$N_a e^{-\beta_a (P-P_i)} + (N_t - x) e^{-\beta_t (P-P_i)} + W - w = \\ = N_a e^{-\beta_a (P_i-P)} + N_t e^{-\beta_t (P_i-P)} \quad (9)$$

Prin dezvoltarea în serie a lui $e^{-\beta \Delta P}$ și prin derivarea în raport cu timpul, ținând seamă că

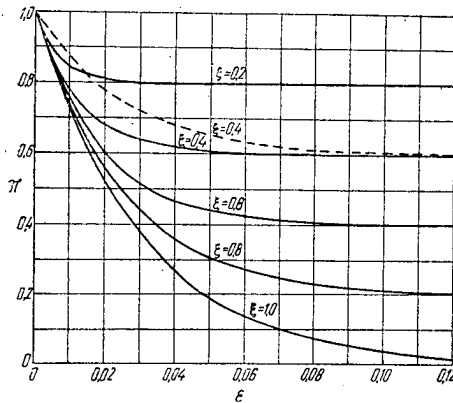


Fig. 26. Comportarea de presiune adimensională, π , a unui zăcămint în regim cu împingere de apă la diferite solicitări ξ , în funcție de coeficientul de extracție, ε , raportat la volumul total de pori al zonei inițial petrolifere a zăcămintului. Curbele continui corespund la $\beta_t = 1,47 \cdot 10^{-4}$ at $^{-1}$ și $P_i = 204$ ata; curba întreruptă corespunde la $\beta_t = 2,94 \cdot 10^{-4}$ at $^{-1}$ și $P_i = 204$ ata.

$dW = K (P_i - P) dt$, (v. Cap. V ec. 47), se obține, după separarea variabilelor P și t , ecuația diferențială liniară de ordinul I

$$(N_a \beta_a + N_t \beta_t - x \beta_t) \frac{dP}{dt} + \left(K - \beta \frac{dx}{dt} \right) P = \\ = KP_i - (1 + \beta_t P_f) \frac{dx}{dt} - \frac{d(W - w)}{dt} \quad (10)$$

Dacă, pentru a se trece de la variabila t la ε (coeficientul de extracție), se admite că zăcămintul este exploatat cu un debit $q = \frac{dx}{dt}$ constant și că analiza se limitează la faza anterioară răzbirii apei în sondele de extracție ($w = 0$) se obține soluția ecuației (10) sub forma

$$\pi = \frac{P}{P_i} = \frac{P_e}{P_i} + \left(1 - \frac{P_e}{P_i} \right) (1 - \varepsilon)^\alpha, \quad (11)$$

unde π este presiunea adimensională medie a zonei petrolifere a zăcămintului;

$$P_e = \frac{1 - (1 + \beta_t P_i)}{\alpha \frac{q}{K P_i} \beta_t}; \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{K}{\beta_t q} - 1; \quad (13)$$

iar

$$\varepsilon = \frac{x}{N_t + N_a \beta_a / \beta_t}, \quad (14)$$

este coeficientul de extracție, raportat la cantitatea totală de lichide inițial conținută în zona petroliferă a zăcămintului, apa fiind exprimată ca țiței, corectată pentru volum, în raportul coeficienților de compresibilitate.

Deoarece $\beta_t \cdot P_f$ este de ordinul 0,01, el poate fi neglijat față de unitate și, notînd $\xi = \frac{q}{K P_i}$, raportul dintre debitul de țiței

impus zăcămintului și debitul de apă invadatoare, maxim posibil al straturii (în cazul neinjectării de apă prin sonde), un coeficient de încărcare a zăcămintului cu sarcini de producție, se obține

$$\pi = 1 - \xi + \xi (1 - \varepsilon)^\alpha. \quad (15)$$

Comportarea de presiune a unui astfel de zăcămint, exploatat în condițiile menționate, prezintă o scădere relativ bruscă a presiunii, urmată de o tendință de stabilizare, cu atît mai rapidă, cu cît sarcina relativă de producție cu care este solicitat zăcămintul este mai mică.

Fig. 26 reprezintă variația lui π în funcție de ε , în conformitate cu ecuația (11), pentru cazul particular $\beta_t P_i = 0,03$ și pentru diferite valori 0,2...0,4...0,6...0,8 și 1,0 ale coeficientului de încărcare ξ , ($P_i = 204$ ata; $\beta_t = 1,47 \cdot 10^{-4}$ at $^{-1}$).

Pentru ilustrarea aproximației de trecere la ecuația (15), curba pentru $\xi = 0,4$ este reprezentată și în cazul $\beta_t P_i = 0,06$. În realitate, solicitarea zăcămintului, ξ , nu poate atinge decît fracțiuni mici din unitate, din cauza condiției $P_f < P$, astfel încît, pentru $\xi = 0,2 \dots 0,3$, presiunea atinge repede o valoare limită P_i , la care debitul de țiței extras, q , este compensat de debitul de apă al straturii dW/dt . În cazul zăcămintelor cu alimentare naturală de apă insuficientă, injectarea diferenței necesare asigură menținerea presiunii.

Din relația (11) rezultă că durata de regim nestabilizat, exprimată în ε , este practic aceeași, indiferent de coeficientul de încărcare, ξ , fiind determinată de caracteristicile geometrice și de cele fizice ale zăcămintului (inclusiv zona acviferă). Aceasta este caracteristica principală care permite să se facă deosebirea între zăcă-

mintele cu regim pur cu împingere de apă și acelea cu regim pur de împingere de gaze (externă, din zona de gaze libere, sau internă, din gazele ocluse eliberate din soluție). Pe cînd la regimul cu împingere de apă, presiunea este (în limita aproximațiilor și în condițiile menționate) determinată de timp și de coeficientul de încărcare ξ , la regimul cu împingere de gaze, presiunea este funcție numai de coeficientul de extracție (în limita aproximațiilor inerente metodei de analiză prin metoda bilanțului material).

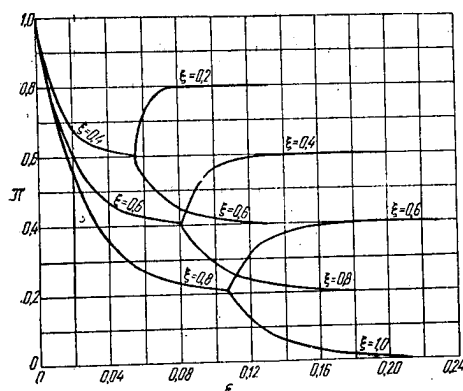


Fig. 27. Comportarea de presiune adimensională, π , a unui regim cu împingere de apă, la diferite solicitări ξ , în funcție de coeficientul de extracție ε , prin readaptare la un nou regim de extracție, $\xi_1 = \xi \pm 0,2$.

În cazul regimurilor reale, la atingerea presiunii de început de fierbere, presiunea își schimbă legea de variație și panta curbelor de scădere a presiunii se reduce. În cazul modificării condiției $\frac{dx}{dt} = q$, prin impunerea unui nou debit constant q_1 , într-un moment oarecare, în care presiunea a ajuns la P_1 și coeficientul de extracție la ε_1 , variația ulterioară a presiunii π este determinată prin aplicarea ecuației (10) la noile condiții de limită, cu soluția

$$\pi = \frac{P}{P_i} = \frac{P_{e1}}{P_i} + \frac{P_1 - P_{e1}}{P_i(1 - \varepsilon_1)^{\alpha_1}} (1 - \varepsilon)^{\alpha_1} \quad (16)$$

în care:

P_{e1} are aceeași definiție ca în relația (12);
 α_1 are aceeași definiție ca în relația (13), corespunzător noului coeficient de încărcare ξ_1 ;

$$\xi_1 = \frac{q_1}{KP_i}$$

Pentru ilustrarea influenței schimbării coeficientului de încărcare, ξ (fie prin modificarea debitului, fie prin injectare, eventual prin extracție de apă din zona acviferă, ceea ce echivalează analitic cu modificarea produsului $K \cdot P_i$), fig. 27 reprezintă comportarea de pre-

siune a zăcămintului analizat în fig. 26, în ipoteza că în momentul cînd π s-a apropiat de π_e

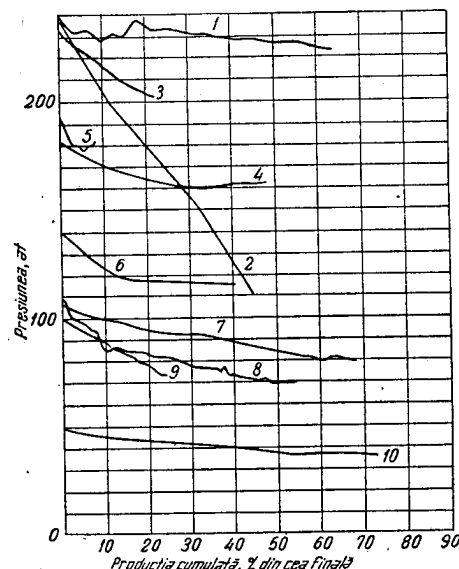


Fig. 28. Comportarea de presiune, în funcție de raportul dintre producția cumulativă și rezerva extractibilă, în %, a zece zăcăminte dintre cari 9 în regim cu împingere de apă predominant:

- 1 — calcare oolitice, $k \leq 15000$ mD; $kh = 11,5$ darcy \times metri; $\frac{N_t + N_a}{m} = 19\,400\,000$ m³;
- 2 — nisip cretacice — regim de gaze din soluție; $k = 350$ mD; $kh \approx 2,300$ darcy \times metri; $\frac{N_t + N_a}{m} = 66\,420\,000$ m³;
- 3 — calcare oolitice, $k < 6750$ mD; $kh \sim 22$ darcy \times metri; $\frac{N_t + N_a}{m} = 645\,000\,000$ m³;
- 4 — nisip oligocen, $k \approx 3000$ mD; $kh \approx 12$ darcy \times metri; $\frac{N_t + N_a}{m} = 6\,800\,000$ m³;
- 5 — calcare oolitice, $k \approx 520$ mD; $kh = 30$ darcy \times metri; $\frac{N_t + N_a}{m} = 360\,000\,000$ m³;
- 6 — nisip ordovician, $k \approx 300$ mD; $kh \approx 15$ darcy \times metri; $\frac{N_t + N_a}{m} = 16\,300\,000$ m³;
- 7 — calcar dolomitic granular cavernos, $k \approx 500 \dots 2000$ mD; kh inexact cunoscut; $\frac{N_t + N_a}{m}$ insuficient cunoscut;
- 8 — nisipuri și gresii din cretacul superior, $k \leq 13\,000$ mD; $kh > 120$ darcy \times metri; $\frac{N_t + N_a}{m} = 2\,420\,000\,000$ m³;
- 9 — nisip ordovician, $k \approx 250$ mD; $kh > 1,5$ darcy \times metri; $\frac{N_t + N_a}{m} = 41\,900\,000$ m³;
- 10 — calcare permiane incomplet deschise, insuficient cunoscute; $\frac{N_t + N_a}{m}$ insuficient cunoscut.

(ne mai diferind de acesta decât cu 1% din $\pi_i - \pi_e$), se modifică debitul extras, astfel încât ξ variază cu $\pm 0,2$. În acest moment, curba $\pi(\epsilon)$ suferă o modificare bruscă; apropiindu-se asimptotic de noua valoare a presiunii-limită, P_{e1} . Panta porțiunii inițiale de readaptare a curbei este mai abruptă în cazul $\xi_1 < \xi$ decât în cazul $\xi_1 > \xi$, deoarece $d\pi/d\epsilon$ cuprinde factorul ξ_1 .

În fig. 28 sînt reprezentate curbele de comportare de presiune, în funcție de procentul de țiței extras, din rezerva extractibilă (raportul $\epsilon_{actual}/\epsilon_{final}$) pentru 9 zăcămintele în regim cu împingere de apă net predominant. Pentru comparație, curba 2 reprezintă comportarea unui zăcămint cu regim de gaze din soluție, predominant (curba 2).

Este de observat că regimurile respective nu sînt pure, însă sînt relativ apropiate. De exemplu, zăcămintul 1 a avut o zonă de gaze libere reprezentînd circa 10% din volumul zonei petrolifere, însă, din cauza unei exploatare neraționale (extracție directă de gaze), ea nu a expandat. Zăcămintul 7 a avut o zonă inițială relativ redusă, care, însă, a acționat cu un coeficient de activitate, ζ (v. Cap. V., H.) foarte mic. În cazul zăcămintului 10, inexistența zonei de gaze este numai probabilă. În majoritatea cazurilor, se observă comportarea caracteristică, anume: căderea inițială de presiune este urmată de o stabilizare aproximativă a presiunii, deși, în general, condiția $\frac{dx}{dt} = \text{const}$ nu a fost satisfăcută

(aproximativ satisfăcută, în ordine, de zăcămintele 8, 5, 6 și 1. Neregularitățile principale de detaliu se datoresc acestei abateri, cum și extracției de apă, $dw/dt > 0$, pe cînd cele de alură se datoresc în parte componentei de regim de gaze din soluție, apărută în evoluția exploatare. În cazul particular al zăcămintului 5, stabilizarea și creșterea presiunii se datoresc începerii operațiilor de menținere a presiunii prin injectare de apă. În cazul zăcămintului 8 de asemenea s-a injectat apă în zăcămint, însă în cantități mult mai mici decât volumul țițeiului de strat, operațiile fiind inițiate în scopul de a se elimina din șantier fără poluarea apelor curgătoare din regiune, marile cantități de apă de zăcămint extrase cu țițeiul.

În analiza comportării zăcămintelor se examinează deseori și indicii de importanță tehnico-economică deosebită: indicele de intensitate specifică a procesului de inundare K_s și indicele de intensitate a exploatare χ . Ambii determină, primul indirect, al doilea direct, durata exploatare și, îndeosebi, costul operațiilor de exploatare (atît cota de amortizare a mijloacelor de bază, cît și cota cheltuielilor direct proporționale cu timpul) pe tona de țiței extras.

K_s este fracțiunea din volumul de pori al zăcămintului (zona petroliferă) invadată de apă pe zi, pentru o diferență de 1 at între presiunea de contur și cea medie din zona petroliferă:

$$K_s = \frac{K}{m \cdot V_z} \quad (17)$$

în care:

K este coeficientul de invazie definit în Cap. V, prin ecuația (47);

m — porozitatea efectivă medie a zonei petrolifere, fracțiune subunitară;

V_z — volumul brut de rocă al zonei petrolifere, în m^3 , determinat prin una dintre metodele cunoscute, de preferat pe cale topo-geologică;

K_s — indicele de intensitate a inundării, fracțiune din volumul de pori invadată pe zi \times at.

Indicele K_s permite compararea regimurilor diferitelor zăcămintele, iar în cazul zăcămintelor în regim elastic cu împingere de apă, importanța sa este deosebită (Cap. II).

Indicele χ este definit ca

$$\chi = \frac{\Delta x}{N \cdot \Delta t} \approx \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} \quad (18)$$

și în cazul zăcămintelor cu regim natural sau artificial întreținut, cu împingere de apă, el are o importanță economică deosebită, fiind într-o primă aproximație constant în timp (în a doua aproximație, lent scăzător, liniar cu timpul). Acest indice permite determinarea aproximativă a duratei exploatare, precum și construcția rapidă a curbei auxiliare de comportare $\epsilon = f(t)$. El are o valoare de orientare; de aceea durata exploatare trebuie determinată mai exact prin metodele de proiectare complexă a exploatare (v. Cap. VII).

Pentru stadiile mai înaintate ale exploatare, în cazul regimurilor cu împingere de apă natural întreținută și al zăcămintelor cu regim natural elastic, dar artificial întreținut, analiza comportării și conducerea exploatare pot fi făcute prin aplicarea ecuațiilor (44) și (45) din Cap. V, introducînd în W atît apa natural invadată, cît și cea injectată prin sonde.

În practică, din necesități tehnico-economice și de plan, ritmul extracției, respectiv ξ sau χ , pot fi fixate la astfel de valori, încît presiunea-limită P_e să fie inferioară presiunii de început de fierbere P_f (se recomandă să se evite aceasta pe cît cu putință). În acest caz, o analiză atentă a comportării zăcămintului cu ecuațiile de bilanț material, bazate pe înregistrări de producție exacte și pe măsurători piezometrice și de coeficienți de volum cît se poate de exacte, poate permite determinarea valorii minime necesare a debitului de apă de injectat, astfel încît presiunea medie în zăcămint rămînînd cît mai apropiată de P_f , amorsarea curgerii gazelor eliberate prin atin-

gerea saturației-limită respective să fie cit mai mult întârziată sau chiar suprimată. Importanța efectului economic astfel realizat reiese din examinarea fig. 36, 60, 62 și 63, Cap. V. Condiția (aproximativă) necesară pentru împiedicarea amorsării curgerii gazelor este

$$\frac{dW_j}{dt} \geq \frac{dx}{dt} u_t + \frac{dw}{dt} - K(P_i - P_f) \quad (19)$$

unde

dW_j/dt este debitul de injecție, în m^3 apă pe zi;

$\frac{dx}{dt}$ — debitul de țitei, în m^3 pe zi;

u_t — coeficientul de volum al țiteiului, $u_t = b_t$ în acest caz, în m^3/m^3 ;

dw/dt — debitul de apă extrasă, în m^3 pe zi;

K — coeficientul de invazie, definit prin relația (47 C), în $m^3/zi \cdot at$.

Observație. Coeficienții de volum ai apei, foarte apropiați de unitate, nu sînt considerați în condiția (19).

Analiza dată a comportării în regim cu împingere de apă este utilă în stadiul incipient al exploatarei. Pentru stadiile mai înaintate și pentru golirea la presiuni inferioare celei de început de fierbere, metoda de analiză necesară este aceea a aplicării ecuației generale de bilanț material (v. Cap. VI B.c. și Cap. II).

b. Regimul cu împingere (externă sau internă) de gaze

Acest regim întreținut artificial prin injecție de gaze, poate fi analizat cu ecuațiile (44), respectiv (45), din Cap. V, în care W (și eventual w) = 0, dacă este cazul (regim fără împingere de apă), și în care se introduc termenii Q_j și B_j , unde Q_j este cantitatea de gaze injectată în zăcămint pînă la momentul t , în m^3N , iar B_j — coeficientul de volum al gazelor injectate, [ecuația (20)]. B_j fiind funcție de natura gazului, de temperatura de zăcămint și de presiunea de zăcămint, poate fi considerat, practic, constant, deoarece: a) gazul injectat este în prealabil debenzinat, astfel încît rămîne cu compoziție practic constantă; b) temperatura de zăcămint este practic constantă; c) presiunea de zăcămint este menținută mai mult sau mai puțin constantă prin natura operațiilor. În cazul invalidității vreuneia dintre ipotezele a), b), și c), B_j trebuie considerat variabil, iar termenul $B_j Q_j$ trebuie calculat ca $\sum B_j \Delta Q_j$, de la 0 la t ,

$$N \left[a u_0 \left(\frac{B_t}{B_0} - 1 \right) + (u_t - u_0) \right] + \sum B_j Q_j = x [u_t + B_t (G - r_0)], \quad (20)$$

în ipoteza inexistenței împingerii sau a extracției apei din zăcămint.

c. Regimul cu împingere simultană de gaze și apă

Ambele artificial întreținute, poate fi analizat cu ajutorul aceleiași ecuații avînd forma generală

$$N \left[a u_0 \left(\frac{B_t}{B_0} - 1 \right) + (u_t - u_0) \right] + \sum B_j Q_j + W + W_j = x [u_t + B_t (G - r_0)] + w \quad (21)$$

Regimul cu împingere simultană de gaze și apă, aplicarea practică a ecuației prezintă dificultățile semnalate la Cap. V, H, cum și aceea că multe dintre zăcămint nu sînt alimentate de o regiune acviferă cu presiune de contur constantă, ci sînt alimentate în regim parțial elastic, astfel încît ecuația (47', V), în loc de a avea forma

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = K(P_s - P_f), \quad (47', V)$$

este

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = K f_1(P_j, t), \quad (22)$$

respectiv

$$W = K f_2(P_f, t). \quad (23)$$

În practică, aplicarea ecuației (23) se face întrucîtva mai precis decît aceea a ecuației (22), afară de stadiul strict inițial al exploatarei, cînd valoarea lor practică este echivalentă.

Pentru cazul unui zăcămint care poate fi asimilat cu un sector circular cu razele: r_p = raza conturului zonei petrolifere, r_a = raza conturului extern al zonei acvifere și α = unghiul de deschidere al sectorului, exprimat în fracțiune de cerc, dacă $r_a > 30 r_p$, se poate practic considera zona acviferă ca infinită și

$$W = \int_0^t \frac{dW}{dt} dt, \quad (24)$$

unde integrarea efectuată în trepte de timp adimensional $0 \dots t_1 \dots t_2 \dots t_n$ definit ca $t_i =$

$= t_i \frac{\Xi}{r_p^2}$ (Ξ fiind coeficientul de piezoconductibilitate al sistemului «strat saturat cu fluid» *)

$\Xi = \frac{k}{u_a (m \beta_a + \beta_r)}$, cu β_a — compresibilitate

*) v. și Cap. II. E a. 2, unde se neglijează compresibilitatea rocii.

ratea apei [pentru β^* , v. Cap. III, formula (51)] și β_r — aceea a rocii, dă:

$$\begin{aligned}\bar{W}_{01} &= 2\alpha\beta^*(P_s - P_0) \int_0^{\bar{t}} \frac{4}{\pi^2} \left[\int_0^{\infty} \frac{e^{-\bar{t}z^2} dz}{z[J_0^2(z) + Y_0^2(z)]} \right] dt = \\ &= 2\alpha\beta(P_s - P_0) \int_0^{\bar{t}} F(\bar{t}) dt \quad (25)\end{aligned}$$

$$\bar{W}_{01} = 2\alpha\beta^*(P_s - P_0) G(\bar{t}) \quad (25')$$

$$\begin{aligned}\bar{W}_{12} &= 2\alpha\beta^*[(P_s - P_0) G(\bar{t}) + \\ &+ (P_s - P_1) G(\bar{t} - \bar{t}_1)], \quad (26)\end{aligned}$$

W_{ik} fiind volumul adimensional (raportat la volumul de pori al zăcămintului, $\pi r_p^2 h m$) de apă pătrunsă în zăcămint, iar P_0 , P_1 și P_2 , presiunile din momentele determinate prin t_0 , t_1 și t_2 .

Pentru evitarea calculului numeric cu funcțiunile Bessel $J_0(z)$ și $Y_0(z)$, se pot folosi fig. 68 și 69 din Cap. II, care dau valorile funcțiilor $F(\bar{t})$ și $G(\bar{t})$, în funcție de timpul adimensional \bar{t} , între limitele $10^{-4} < \bar{t} < 10^6$ pentru ambele funcții.

Pentru cazul cînd $r_a < 20 r_p$, r_a nu mai poate fi considerat infinit. Atît în acest caz, cit și în cazul cînd forma zăcămintului se abate simțitor de la cea de sector circular, analiza debitului de apă invadată, respectiv a volumului cumulativ, în funcție de timp, devine oneroasă prin metodele analitice obișnuite aplicate la ecuațiile de expansiune elastică și se preferă rezolvarea cu ajutorul electointegratorului (v. și Cap. II).

d. Condițiile și particularitățile folosirii ecuațiilor de bilanț material

Utilizările principale ale ecuației generale de bilanț material sînt: a) determinarea sau verificarea cantității de țiței existent inițial în zăcămint; b) urmărirea și controlul eficienței cu care are loc procesul de golire a zăcămintului; c) analiza activității relative a diferiților agenți energetici naturali ce participă la golire; d) aprecierea activității agenților energetici artificiali folosiți pentru ameliorarea procesului de golire; e) prevederea comportării viitoare a zăcămintului în diferite variante de exploatare, îndeosebi în ce privește presiunea, prevederile de rație de gaze fiind relativ nesigure, din cauza dependenței acesteia de modul de solicitare a zăcămintului; și, pe baza acestor aplicații, f) proiectarea exploatarea zăcămintului.

Valoarea ecuațiilor de bilanț material este deosebit de importantă în stadiul inițial al exploatarea, deși în această perioadă informațiile date sînt mai puțin sigure. Precizia cu care se poate determina N este relativ redusă (între 3 și 10%), după abundența și precizia

datelor de plecare. Precizia chiar între aceste limite a cantităților de țiței prezente în zăcămint, într-un stadiu de exploatare în care nu s-au extras din zăcămint decît cîteva procente din rezerva lui și în care deseori, deschiderea întregului zăcămint prin sonde nu a fost efectuată, este deosebit de prețioasă*). În principiu calculul cantității inițiale de țiței, N , poate fi efectuat mai exact prin metodele topo-geologice, denumite și « volumetrice » care însă cer: delimitarea în proiecție orizontală a zonei petrolifere, determinarea repartiției grosimii verticale a stratului (hărți de izopace), determinarea porozității printr-un număr foarte mare de carote (din cauza variabilității verticale și a celei laterale a caracteristicilor colectoare ale rocii), determinarea saturației în țiței, pe lingă cunoașterea coeficienților de volum ai gazelor și a țițeiului, necesară și în cazul bilanțului material.

Limitările principale ale aplicării ecuațiilor de bilanț material constă în estimarea cantității de apă invadată W și în necunoașterea suficient de exactă a presiunii medii de zăcămint, datorită căreia se determină valorile parametrilor u_e , b_e și B_e , care trebuie deduși din curbele de dependență lor de presiune (presupuse ridicate experimental în cele mai bune condiții).

Imprecizia lui W este de mică influență în stadiul inițial, deoarece, din cauza scăderii mici a presiunii, debitele $\frac{dW}{dt}$ sînt mici.

În cazul unei scăderi liniare cu timpul a presiunii (totdeauna admisibilă pe intervale de timp scurte) și al valabilității aproximative a ecuației (47, Cap. V), $dw/dt = c \cdot t$, respectiv $W = 0,5 c \cdot t^2$ sau, notînd cu \bar{t} timpul adimensional,

$$\bar{t} = \frac{t}{T} \quad (27)**$$

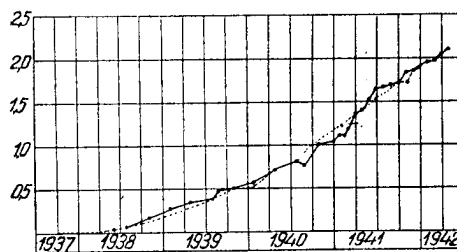


Fig. 29. Comparatie între $W(t)$ calculată cu ajutorul ecuațiilor de bilanț material (curba continuă) și cu ajutorul ecuațiilor de curgere nestabilizată (24)...(26), (curba întreruptă) pentru zăcămintul (2), fig. 28. De observat alura parabolică a curbei, în conformitate cu ipoteza (28).

*) Trebuie să se precizeze că la determinarea țițeiului inițial, N , prin ecuațiile de bilanț material se face abstracție totală de cunoașterea exactă a dimensiunilor zonei petrolifere, de porozitate, de permeabilitate, de saturație etc.

**) Notatia \bar{t} este strict limitată la acest caz.

ANALIZA PROCESULUI DE GOLIRE A ZĂCĂMÎNTULUI

459

unde T este durata totală a exploatareii,

$$W = C \tilde{t}^2 \quad (28)$$

astfel încît, în acest stadiu, W are o valoare relativă de ordinul al doilea chiar în cazul cînd zăcămintul are o apă relativ activă v. fig. 29).

Posibilitatea acestei neglijări rezultă și din analiza rezultatelor aplicării ecuațiilor de bilanț material la zăcămintul 2 din fig. 28, tabela 5.

Este de observat că, în faza inițială, neglijînd invazia apei și estimînd prin metode de extrapolare, foarte aproximativ, zona de gaze libere, în coloana N_2 , la o valoare superioară

(Tabela 5. Analiza parțială cu ecuațiile de bilanț material a zăcămintului (2) fig. 28 (Efectul neglijării împingerii apelor marginale în faza inițială și efectul neglijării existenței unei zone de gaze libere inițiale, relativ mică)

	P , at ef	$x, m^3 \cdot 10^6$	ε %	$u, m^3/m^3$	$Q_j \cdot Nm^3 \cdot 10^6$	$W^* m^3 \cdot 10^6$	$N_1 10^6 m^3$	$N_2 10^6 m^3$	$N_3 10^6 m^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1937									
septembrie	239,7	—	—	1,450					
1938									
iulie	212,8	0,448	3,26	1,490		0,01201	17,66	13,30	11,65
octombrie	198,1	0,740	5,48	1,5173		0,02856	18,28	13,91	12,23
1939									
ianuarie	189,6	0,958	6,89	1,537		0,04812	18,98	14,55	12,53
aprilie	180,4	1,170	8,50	1,560		0,06058	18,91	14,46	12,03
iulie	170,5	1,392	10,11	1,5887		0,07000	18,60	14,32	11,72
august	170,3	1,433	10,41	1,5890		0,08498	19,19	14,91	12,01
octombrie	165,1	1,570	11,41	1,6080		0,09250	19,02	14,82	11,80
1940									
ianuarie	155,9	1,780	12,93	1,6454		0,1033	18,69	14,58	12,09
aprilie	144,7	2,006	14,58	1,6975		0,1310	18,65	14,62	11,81
iulie	132,7	2,225	16,17	1,766		0,1474	18,25	14,40	12,06
august	127,9	2,300	16,71	1,801		0,1394	17,82	14,05	11,50
octombrie	121,5	2,436	17,70	1,8495		0,1816	18,12	14,33	11,90
decembrie	113,7	2,565	18,65	1,915		0,1871	17,78	14,06	11,76
1941									
ianuarie	110,0	2,633	19,13	1,940		0,2034	17,85	14,13	11,86
februarie	109,6	2,662	19,35	1,953		0,1987	17,73	14,03	11,72
februarie	109,5	2,693	19,57	1,954		0,2140	17,90	14,19	11,83
martie	109,0	2,758	20,04	1,959		0,2437	18,19	14,49	12,05
aprilie	107,2	2,824	20,52	1,9775		0,2518	18,17	14,49	12,03
mai	105,85	2,890	21,00	1,9915		0,2715	18,31	14,64	12,12
iunie	104,62	2,956	21,48	2,005		0,2950	18,47	14,81	12,25
iulie	103,05	3,023	21,96	2,0225	10,54	0,2979	18,41	14,75	12,19
august	102,45	3,089	22,44	2,030	27,04	0,3010	18,38	14,74	12,06
septembrie	102,24	3,153	22,92	2,033	14,20	0,3058	18,43	14,77	12,03
octombrie	102,50	3,220	23,40	2,030	60,45	0,3236	18,61	14,97	12,18
noiembrie	102,50	3,284	23,87	2,030	78,20	0,3341	18,71	15,06	12,07
decembrie	102,15	3,350	24,35	2,034	96,40	0,3387	18,73	15,08	12,04
1942									
ianuarie	102,02	3,415	24,82	2,036	113,50	0,3485	18,80	15,16	12,01
februarie	101,58	3,474	25,25	2,041	131,70	0,3521	18,81	15,18	11,99
martie	100,96	3,540	25,72	2,040	152,75	0,3660	18,95	15,30	11,97
aprilie	100,96	3,599	26,15	2,040	166,72	0,3765	19,05	15,42	12,03

Media (pe baza celor mai mici sume ale pătratelor abaterilor). Abaterea medie pătratică în %.

$N \approx 13\,761\,000\,m^3$ țîței comercial inițial în zăcămint (calculat prin metoda spațiului de pori saturat).

* Calculat prin aplicarea repetată a ecuațiilor de bilanț material, pe baza $N = 13\,763\,000\,m^3$.

N_1 Calculat prin aplicarea repetată a ecuațiilor de bilanț material, pe baza ipotezei $\alpha = W = 0$.

N_2 Calculat prin aplicarea repetată a ecuațiilor de bilanț material, pe baza ipotezei $W = 0$; $V_0 B_0 = 1,59 \cdot 10^6\,m^3$.

N_3 Calculat prin aplicarea repetată a ecuațiilor de bilanț material, pe baza ipotezei $V_0 B_0 = 1,417 \cdot 10^6\,m^3$.

$$W = \int_0^t 600(p_i - p) \, dt, \text{ cu timpul, în zile, și cu presiunile, în atmosfere.}$$

cu circa 15% celei reale, se obține din media primelor două valori ale lui N_2 , valoarea $13,605 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, care prezintă o eroare de - 1,15% față de valoarea cea mai probabilă

să se determine presiunea cu sonda oprită un timp suficient pentru determinarea presiunii medii reale, a zăcămintului, urmînd ca la celelalte sonde estimarea presiunii cu sonda

oprită să se facă prin extrapolare după aluracurbei de restabilirea presiunii în intervale scurte de oprire. Folosirea metodelor analitice de extrapolare a curbei de stabilizare a presiunii este permisă în acest scop numai cît timp țiteiul este subsaturat. De îndată ce presiunea a scăzut pe regiuni însemnate, sub presiunea de început de fierbere, determinarea exactă a presiunii medii a zăcămintului necesită oprirea tuturor sondelor*). În acest caz, dacă oprirea este posibilă, este indispensabilă măsura presiunii într-un număr cît mai mare de sonde, pentru ca, după determinarea caracteristicilor stratului, la următoarele măsurători de presiune în sonde izolate, să se poată determina presiunea medie a stratului, evaluînd prin metode hidrodinamice efectul sondelor în producție. În general, însă, oprirea nu este posibilă din considerente economice; iar pentru acest motiv este necesar studiul cît mai amănunțit al presiunilor în perioada curgerii monofazice**).

Comportarea generală de exploatare a zăcămintului analizat în tabela 5 este dată în fig. 30, iar tentativa de prevedere a evoluției presiunilor în diferite ipoteze de ritm de exploatare, estimată cu ecuațiile de bilanț material, în fig. 31.

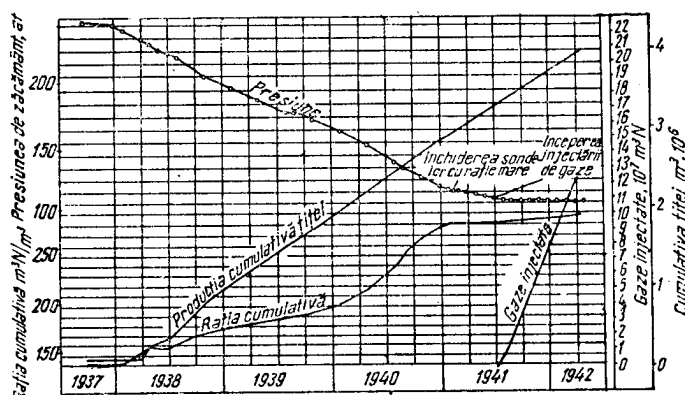


Fig. 30. Comportarea generală (presiune, producție și rație medii cumulate) a zăcămintului (2) din fig. 28.

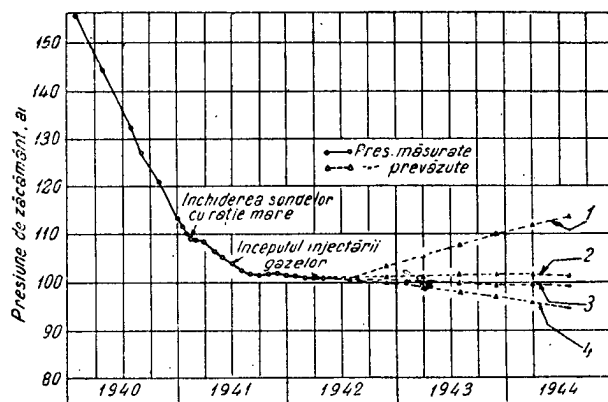


Fig. 31. Comportarea viitoare probabilă de presiune, apreciată cu ecuațiile de bilanț material, a zăcămintului (2) din fig. 28; 1 — în ipoteza închiderii complete a zăcămintului și a continuării injectării gazelor în același ritm; 2 — în ipoteza exploatarei prin extragerea a 1910 m^3 țitei comercial zilnic, cu o rație netă de $26,7 \text{ m}^3 \text{ N/m}^3$; 3 — în ipoteza exploatarei prin extragerea a 2390 m^3 țitei comercial zilnic, cu o rație netă de $26,7 \text{ m}^3 \text{ N/m}^3$; 4 — în ipoteza exploatarei prin extragerea a 3180 m^3 țitei comercial zilnic, cu o rație netă de $26,7 \text{ m}^3 \text{ N/m}^3$; Linia continuă: comportarea efectivă; Linia întreruptă: comportarea estimată.

stabilită ulterior prin metoda saturațiilor și prin aplicarea pe un interval mult mai lung a ecuațiilor de bilanț material, de $13,763 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

În această primă fază a exploatarei, dificultatea principală o constituie determinarea cît mai exactă a presiunii medii a zăcămintului. În acest scop, trebuie alese cîteva sonde-cheie, distribuite cît mai uniform în zăcămint, în care

*) Pentru extrapolarea în regim nestationar v. și Cap. V și lucrarea lui N. S. Nazarov din Nef. Hoz. 1/1955 pag. 46—52.

**) Deși într-o primă aproximație presiunea medie din poliedrul de drenaj al unei sonde poate fi (și de obicei este) luată egală cu cea de la conturul acestuia, este mai exact să se ia o valoare mai mică decît aceasta cu 3...5% din diferența între presiunea conturului și cea de la perforaturile sondei în mers.

C. NATURA, CARACTERISTICILE, DOMENIILE ȘI CONDIȚIILE DE APLICABILITATE ALE DIFERITELOR METODE DE ACTIVAREA GOLIRII PRIN INTERVENȚIA FACTORILOR ARTIFICIALI *)

a. Metode care folosesc completarea energiei mecanice de drenaj **)

1. Metodele de menținere a presiunii sînt caracterizate prin injectarea în zăcămint prin sonde convenabil distribuite, a unui agent material de dezlocuire, gaze naturale, aer sau apă în cantități avînd volume egale, la condițiile de presiune și temperatură din zăcămint, cu cel al sumei volumelor țiteiului, apei și eventualcelor gaze libere extrase din zăcămint, la aceeași temperatură și presiune.

Scopul aplicării lor este sporirea simțitoare a coeficientului final de extracție în țitei, ϵ . Aceasta se datorește realizării unei valori medii în timp și spațiu, simțitor mai mare; a raportului κ/μ_t , respectiv k_t/μ_t . Prin transformarea regimului de epuizare, al gazelor din soluție, într-un regim de dezlocuire externă cu apă sau gaze, se realizează un mecanism de golire diferit. În loc ca golirea zăcămintului să constituie rezultatul principal al scăderii progresive a saturației în țitei, S_t , a unui volum de rocă petroliferă constant (exprimat practic, la grosime constantă, prin suprafața inițial petroliferă, F_0 , în proiecție orizontală), ea are loc din cauza reducerii acestui volum, respectiv a acestei suprafețe, păstrîndu-se constantă saturația în țitei S_t . Dacă procedeul este aplicat în condițiile cele mai raționale la începutul exploatării sau, cel puțin, înainte ca presiunea de zăcămint să fi atins valoarea P_f , de început de fierbere, $S_f = 1 - S_a$, iar $k_t \approx 1$.

Prin aceasta se realizează un consum minim de energie pentru drenaj, ceea ce asigură: a) o golire mai înaintată, (ϵ), a zăcămintului; b) un consum mai redus de energie pentru compensarea golirii unei aceleiași fracțiuni din volumul de pori (îndeosebi, în cazul injectării gazelor); c) o viață eruptivă mai îndelungată, raportată atît la timp, dar mai ales, la producția cumulativă de țitei; d) posibilitatea drenării eficiente a zăcămintului cu un număr simțitor redus de sonde, factor economic de importanță deosebită; e) menținerea unor debite dx/dt , ridicate, reducerea duratei de exploatare și, corespunzător, a cotei de cheltuieli respective de exploatare din prețul de cost.

Aceeași aplicare a metodei în faza anterioară atingerii presiunii de început de fierbere asigură, prin păstrarea gazelor în soluție, o valoare

minimă μ_t și, în ultimă analiză, consecințele a), b), c), d) și e) menționate.

Alegerea fluidului motor. Fluidele utilizate pentru acest scop sînt virtual: apa dulce de suprafață sau subterană, apa sărată de zăcămint provenită fie din strate acvifere lipsite de cantități, economic exploatabile, de țitei, fie din însuși stratul exploatat (numai pentru menținerea parțială a presiunii); sau gazele, naturale de sondă, provenite din zăcămint de gaze uscate (CH_4) sau de gaze și de țitei, în principiu după o extragere a fracțiunilor grele, gazoline, eventual și gazele lichifiabile, gazele de sondă cu alte compoziții, N sau CO_2 (în condiții cu totul particulare, cînd sînt disponibile la presiune ridicată), gazele de combustie de la motoare sau focare industriale (sub rezerva controlului corozivității), relativ rar, gaze industriale de proveniență specială, gaze sărace de furnal înalt, după epurare (în cazuri cu totul particulare, în care se urmărește în același timp și înmagazinarea lor temporară, și sporirea puterii lor calorifice), gaz de abur (Ипарораз) și aerul.

Referitor la alegerea între apele dulci și apele de suprafață, v. Cap. V A. b. 2. și Cap. VII și XVIII. Uneori, în cazul apei, soluția aleasă este mixtă, putîndu-se realiza o permeabilitate aproape nealterată a rocii față de țitei, cu o salinitate foarte redusă a apei (de ordinul a 2%), ceea ce permite folosirea unor mari cantități de apă dulce altfel inutilizabilă, în amestec cu mici cantități de apă de zăcămint, după verificarea experimentală pe carote a stabilității și efectului asupra permeabilității. Apa de zăcămint și mai ales cea proprie a stratului sînt totdeauna de preferat din punctul de vedere al comportării în zăcămint v. (Cap. VI A. b.).

Referitor la alegerea între diferitele gaze, gazele naturale provenite din zăcămint de țitei și gaze sau numai de gaze, sînt totdeauna de preferat. Efectul mai bun asupra viscozității pe care îl au gazele din care nu s-au eliminat fracțiunile ușor lichifiabile este depășit, în general, de efectul economic obținut prin recuperarea imediată a acestor fracțiuni, astfel încît, practic, totdeauna gazele injectate sînt pretratate în mod corespunzător. Gazele naturale sau cele artificiale cu conținut important de CO_2 prezintă, datorită solubilității deosebit de mari a acestuia în țiteiuri (de ordinul a $0,8 - 1,2 \text{ m}^3 \text{N/m}^3 \cdot \text{at}$), particularitatea unui efect întîrziat: efectul de dezlocuire este redus, în parte, prin intrarea CO_2 în soluție, însă este compensat în parte, imediat, prin sporirea de volum a fazei lichide, datorită intrării CO_2 în soluție *), și, în parte, este compensat

*) Efectul practic asupra permeabilității efective nu este neglijabil, din cauza valorii foarte mari, în anumite game de saturație, a derivatei

$$\frac{\partial k_{\text{lichid}}}{\partial S_{\text{lichid}}} \text{ respectiv } \frac{\partial (k_t/k_g)}{\partial S_t}$$

*) În sens larg, * metodele de recuperare secundară *.
**) Clasificarea se referă la cea de la începutul capitolului VI.

ulterior prin lucrul mecanic de dezlocuire, efectuat la ieșirea din soluție a gazului, în stadiul final al exploatării. Alegerea între gazele naturale și celelalte gaze industriale menționate este o problemă, în cea mai mare parte economică, cu aspecte diferite de la caz la caz.

Alegerea între gazele naturale de zăcămint și aer, foarte dezbătută din considerente economice, este soluționată numai după un studiu îngrijit al comportării aerului ca agent motor. Folosirea gazelor de țiței, cu toate avantajele ei tehnice, este grevată de imobilizarea valorii utile a acestora ca combustibil etc., în mod neproductiv direct, un timp de cel puțin câțiva ani, în cantități foarte importante pentru economia socialistă.

Folosirea aerului, cu toate avantajele ei economice imediate, prezintă riscuri extrem de serioase. În condițiile de temperatură și de presiune din zăcămint, aerul produce o oxidare mai mult sau mai puțin intensă a unora dintre componentii țițeiului; aceștia trec în produse asfaltice, fie solide, fie care sporesc în mare măsură viscozitatea țițeiului în care rămân în soluție. În general, însă, procesul, odată început, se continuă pînă la blocarea practică a stratului. Spre deosebire de fenomenele asemănătoare întâlnite la folosirea aerului pentru întreținerea erupției artificiale, efectul este mult mai intens, datorită duratei de contact mult mai mari, temperaturii mai ridicate și efectului catalitic al rocii colectoare. Durata de contact a țițeiului cu aerul este sporită de la câteva zeci de minute la câțiva ani, temperatura este sporită, în mod corespunzător adîncimii, cu 20...50°C față de erupția artificială (temperatura gazului și a suprafeței țiței-gaz), iar efectul temperaturii asupra vitezei de reacție, dînd acesteia, în general, o variație exponențială, poate avea o importanță deosebită în cazul adîncimilor mari. Efectul catalitic asupra reacțiilor de oxidare a țițeiului la contactul cu aerul, al silicaților de aluminiu hidratați prezenți în rocă, la temperaturi de +60°C pînă la +110°C, poate fi extrem de intens.

Din aceste cauze, folosirea aerului trebuie admisă numai după efectuarea cu rezultat favorabil a încercărilor respective cu țiței și carote din zăcămintul respectiv, la scara de laborator și apoi la scară semi-industrială, în porțiuni de zăcămint astfel alese, încît, în cazul unor rezultate negative, consecințele să fie cît mai puțin păgubitoare (sondele de injecție în regiunile periclinale sau în regiuni de falii transversale, de permeabilitate cunoscută).

La alegerea între apă și gaze trebuie să se țină seama de:

Avantajele economice ale apei:

— Costul procurării, redus, din surse locale și relativ abundente, cu restricția condiționării, v. Cap. XVIII.

— Costul injectării, redus, prin costul redus al pompelor față de compresoarele care ar

genera același volum de fluid motor deplasat în zăcămint, cum și prin costul redus al energiei de injectare, deoarece apa necesită numai lucrul mecanic de dezlocuire, pe cînd gazele necesită atît lucrul de dezlocuire, cît și acela de comprimare ($\beta_{ap\bar{a}} \approx 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$, pe cînd $\beta_{gaz} \approx 10^{-1} \dots 10^{-2,5}$).

— Efecte de canalizare mult mai reduse ($\mu_t/\mu_a = 1,5 \dots 2$, pe cînd $\mu_t/\mu_g = 10^2 \dots 10^3$) în curgere pe parcurs orizontal.

Avantajele tehnice ale gazelor:

— Efectul de reducere a viscozității prin intrarea în soluție.

— Eficiența mai mare a separației gravitaționale și a componentei de regim gravitațional, lent dar foarte eficient, ($\gamma_t/\gamma_a = 0,8$, pe cînd $\gamma_t/\gamma_g = 10 - 10^3$).

— Condițiile particulare de zăcămint care favorizează acțiunea unuia dintre cele două fluide. Separarea gravitațională și acțiunea gazelor sînt influențate favorabil de:

— înclinarea mare a stratelor;
— grosimea mare a stratelor și lipsa de intercalații impermeabile;
— permeabilitatea generală, mare, a rocii colectoare;

— uniformitatea permeabilității în zăcămint;
— izotropia permeabilității (v. Cap. III, B. b. 5. și analogia 9. a) 4) în zăcămint;

— prezența unei ape marginale sau de talpă, foarte activă, face rațională injectarea de gaze, pentru a se reduce (la debit egal de fluid motor injectat, măsurat în condițiile de strat) vitezele frontului de apă și, deci, considerabil, riscul reprezentat de limbi, respectiv de conuri.

Pe de altă parte, alegerea gazelor este determinată de:

— prezența de material argilos hidratabil în cimentul rocii colectoare;

— înclinarea mică a stratelor;

— grosimea redusă a stratelor.

Permeabilitatea redusă a stratelor, consecință a unei granulometрии eterogene și a unui diametru mic de bob echivalent de rocă fictivă (nu însă a prezenței de liant argilos bentonitic), fără a fi propriu zis factori favorizanți ai lucrului apei, sînt de natură a influența alegerea în favoarea apei.

Presiunea inițială de zăcămint foarte mare, putînd necesita presiuni de injectare mult mai mari decît cele realizabile cu compresoarele disponibile, poate decide, cel puțin pentru perioada inițială a menținerii presiunii, în favoarea apei.

În afară de aceasta, condițiile particulare de umiditate a elementelor rocii colectoare, de către fluidele saturante, pot crea condiții favorizante pentru gaze, sau apă. Cunoașterea acestor condiții este, însă, relativ dificilă și în general, ele pledează în favoarea apei. Se cunosc cazuri speciale în care roca colectoare, practic hidrofobă, este supusă, în cazul unei

menținerii a presiunii prin injectare de gaze, unui regim particular de golire în regim gravitațional la presiune ridicată, în care se atinge un coeficient de extracție în țitei dintre cei mai ridicați ($\epsilon \approx 0,8-0,9$).

a) *Menținerea presiunii prin injectare de apă* este efectuată, în marea majoritate a cazurilor, prin sonde de injecție distribuite în șiruri dispuse în apropierea zonei de tranziție apă-țitei, în zona de apă.

Este de recomandat ca distanța dintre acest contur și șirul de sonde de injecție să nu fie mult mai mică decât jumătatea distanței dintre sonde în șir, pentru a se evita favorizarea canalizărilor (v. Cap. II. H. a.).

În cazul excepțional al injectării prin sonde mai apropiate, este necesar ca debitul de injecție să fie inițial restrâns, astfel încât viteza locală de avansare a suprafeței de contact apă-țitei, să rămână constantă.

Debitul de apă de injectat în perioada de regim a operațiilor este determinat de condiția egalității volumelor injectate, respectiv extrase, comparate la condițiile de zăcămint. Cu aproximație $b_a = 1$, condiția este

$$\frac{dW_j}{dt} = \frac{dx}{dt} b_t + \frac{dW}{dt} (G_{cr} - r_t) B_t + \frac{dw}{dt} - \frac{dW}{dt} \quad (29)$$

unde

- dW_j/dt este debitul de apă injectată, în m^3/zi ;
- dx/dt — debitul de țitei extras, în m^3/zi ;
- G_{cr} — rația curentă gaze-țitei (de producție), în m^3N/m^3 ;
- b_t — coeficientul de volum al țiteiului corespunzător presiunii medii de zăcămint, în m^3 lichid/ m^3 lichid;
- B_t — coeficientul de volum al gazelor extrase corespunzător presiunii medii de zăcămint, în m^3/m^3N ;
- r_t — rația de soluție, m^3N/m^3 ; corespunzătoare lui b_t ;
- dw/dt — debitul de apă extrasă, în m^3/zi ;
- dW/dt — debitul de apă invadată, m^3/zi ; determinabil cu ecuația (47', Cap. V) (22) sau (24) și (25) — (26).

Referitor la distribuția sondelor, la repartiția debitelor de injecție și de extracție în timp și în spațiu, a se vedea Cap. VII.

Referitor la construcția sondelor, la condiționarea apelor și la controlul operațiilor, a se vedea Cap. XVIII.

b) *Menținerea presiunii prin injectare de gaze* este efectuată, în principiu, prin sonde de injecție situate în zona de gaze libere a zăcămintului, pentru a reduce pierderea de presiune în strat care s-ar produce prin suprapunerea efectului gradientilor mari de pre-

siune în imediata vecinătate a găurii de sondă, cu efectul de reducere a permeabilității efective față de gaze, datorită prezenței țiteiului. Datorită viscozității foarte mici a gazelor, debitele de injecție realizabile într-o sondă sînt relativ mari (de ordinul a $10^4 \dots 10^6 m^3N/zi$ și sondă), astfel încît numărul de sonde de injecție necesare este mult mai mic decît în cazul apei și încă mult mai mic (de ordinul 3 la 10%) decît numărul de sonde de extracție. Din cauza valorii foarte mari a raportului viscozității țiteiului și gazelor μ_t/μ_g , stabilitatea formei suprafeței de separație gaze-țitei este foarte redusă (principalul factor care o întreține este separarea gravitațională, iar diferența de greutate specifică, de ordinul $0,8 t/m^3$ la condițiile atmosferice, este redusă la aproape jumătate în condiții relativ frecvent întîlnite la adîncimi mai mari decît 2 000 m, respectiv la zero, în apropierea punctului critic), ceea ce favorizează foarte mult strecurarea gazelor înaintea țiteiului și formarea de canalizări. Aceste canale, odată formate, constituie căi de scurtcircuit al gazelor, datorită permeabilității lor efective foarte mici față de țitei (v. fig. 60 din Capitolul V pentru k_g/k_t), și nu pot fi lichidate radical decît prin oprirea producției și prin sporirea presiunii pînă la intrarea în soluție a gazelor, ceea ce practic este extrem de greu de realizat, din considerente economice. Combaterea canalizărilor prin mijloace mecanice, injectare selectivă prin pakere, extracție selectivă prin pakere, închiderea prin cimentare sau prin rășini plastice, blocarea intenționată a formației în care s-a produs canalizarea prin injectarea de apă, de noroi extracția țiteiului cu intermitențe etc., sînt mijloace de necontestată valoare practică, dar care nu lichidează, în general, decît temporar canalizarea. În general, rezultatele operațiilor de lichidarea canalizărilor sînt cu atît mai favorabile, cu cît măsurile respective sînt luate mai de timpuriu. O canalizare detectată și atacată imediat poate fi adesea lichidată după o închidere de foarte scurtă durată a sondei în care ea s-a manifestat, uneori chiar numai printr-o restricție temporară a debitului ei (în cazul rocilor colectoare cu permeabilitate mică sau al sondelor la care s-au efectuat accidental suprasolicități de producție de scurtă durată), astfel încît pierderea de producție rezultantă poate fi compensată prin extragerea unei cantități de țitei corespunzătoare prin celelalte sonde. În acest scop, gazele injectate sînt contaminate în mod intenționat cu un indicator chimic sau fizic. Mercaptanul folosit în acest scop, deși prezintă avantajul de a fi detectabil la concentrații foarte reduse, fără probe de laborator, prin miros, este adsorbit totuși, în parte, de rocă și în parte de țitei, astfel încît nu este totdeauna eficient în timp-util. În unele cazuri, el este prezent în mod natural în țitei, ceea ce îl face impropriu scopului urmărit. Heliul are o comportare

excepțional de bună din acest punct de vedere, însă este relativ scump și necesită o aparatură foarte scumpă pentru dozare *). În general, însă, necesitatea de intervenție este semnalată mai prompt de însăși creșterea rației de gaze a sondei productive respective și din această cauză, aplicarea metodei de menținere a presiunii prin injectare de gaze trebuie însoțită de un control foarte atent și frecvent al debitelor și al rațiilor. Repartiția sarcinilor de producție de țiței între sonde trebuie stabilită pe criteriul rației de gaze globale minime, ceea ce se realizează prin încărcarea sondelor cu rație mică și restricția celor cu rație mare, urmărită la intervale de timp cit mai scurte.

Condiția unei mențineri totale a presiunii prin injectare de gaze, în cazul unui zăcămint fără apă activă, este

$$\frac{dQ_j}{dt} B_j = \frac{dx}{dt} b_t + \frac{dx}{dt} (G_{cr} - r_t) B_t \quad (30)$$

unde, în afară de notațiile din relațiile (29) și (7), se face deosebirea expresă între B_j și B_t . Ea se datorește diferenței dintre natura gazelor respective, gazele bogate extrase din zăcămint prezentînd abateri simțitor mai mari de la legea gazelor perfecte decît cele sărace care se injectează în zăcămint după debenzinare și după extracția gazelor lichefiabile.

Sub forma de rație și cu $B_j \approx B_t$, ecuația (30) se prezintă în forma

$$\frac{\frac{dQ_j}{dt} \cdot \frac{dt}{dx}}{G_{cr}} = \theta = 1 + \frac{1}{G_{cr}} \left(b_t - r_t \right), \quad (31)$$

Din ecuația (31) rezultă că, în general, $\theta > 1$, ceea ce confirmă constatarea, evidentă de

altfel, că gazele proprii ale zăcămintului nu sînt suficiente pentru menținerea strictă a presiunii, chiar dacă nu se extrage apă.

În particular, însă, menținerea presiunii este totuși posibilă dacă $r_t > b_t/B_t$. Aceasta are loc, însă, numai la presiuni foarte joase și în orice caz numai în condiții în care țițeiul continuă să elibereze gaze din soluție.

În practică, într-un zăcămint fără ape active, menținerea presiunii nu poate fi realizată integral numai prin injectare de gaze extrase din același zăcămint, ceea ce însă scade mai mult aparent decît real valoarea metodei. În adevăr, printr-o aplicare timpurie a sa, cu o reinjectare a unei fracțiuni, θ , cit mai aproape de unitate, din gazele extrase, în condiții favorabile de segregare a gazelor din țiței, se poate: 1) prelungi foarte mult durata de exploatare în aflus monofazic și 2) controla raportul dintre debitele extrase și debitele de segregare gravitațională, astfel încît totalitatea gazelor eliberate să fie colectate în zona de gaze libere, iar energia lor de detentă să fie integral folosită pentru aflusul lichidului, în absența canalizărilor.

Într-un zăcămint fără apă marginală sau de talpă, activă, și fără zonă inițială de gaze libere, în care segregarea gravitațională nu este stînjinită și în care se introduce o fracțiune, θ , din gazele extrase, se produce o creștere continuă a zonei de gaze libere, formată prin scăderea presiunii, ieșirea din soluție a gazelor și reinjectarea celor produse, astfel încît variația raportului dintre volumele efective de zăcămint ale zonei de gaze libere secundară și zonei de saturație cu țiței inițiale, notat cu \bar{a} , are loc, după legea de curgere eterogenă, în conformitate cu ecuațiile (6) și (7), după relația (32):

$$\bar{a} = \theta \cdot \frac{\left(\frac{1}{B_0} - \frac{1}{B_t} \right) (1 - S_a) + S_t \left(\frac{1}{B_t} - \frac{r_t}{b_t} \right) - S_{or} \left(\frac{1}{B_0} - \frac{r_0}{b_a} \right)}{\frac{1 - \theta}{B_t} (1 - S_a) + \left[\frac{\theta S_t}{b} - \bar{S}_t \right] \left(\frac{b_t}{B_t} - r_t \right)} \quad (32)$$

unde, în afară de notațiile citate, S_{or} este saturația inițială în țiței a rocii colectoare și \bar{S}_t — saturația în țiței reziduală a zonei de gaze libere, formată în decursul exploatarei.

În cazul zăcămintului menționat, cu o rocă de proprietăți colectoare ca ale rocii din exemplul reprezentat în fig. 59—62, Cap. V, cu țiței și cu gaze avînd aceleași proprietăți ca în cazul menționat, comportarea în exploatarea cu menținerea parțială a presiunii prin reinjectarea fracțiunii θ este cea redată în fig. 34 și 35.

c) Menținerea presiunii prin injectare simultană de apă și de gaze este aplicată:

*) Deosebit de promițătoare este folosirea în același scop a izotopilor radioactivi, în curs de experimentare.

1) în cazul absenței sau al insuficienței activității apelor marginale (v. fig. 31);

2) în cazul absenței inițiale sau al insuficienței dimensiunilor și a posibilității de expansiune regulată și fără canalizări a zonei de gaze libere;

3) în cazul incapacității stratului de a primi fie gaze, fie apă, injectate cu debitul determinat prin ecuația (29), respectiv (30);

4) pentru a compensa necesitatea practică de a se lucra cu $\theta < 1$, (insuficiența gazelor sau a compresoarelor disponibile);

5) pentru a se reduce viteza medie de deplasare a suprafețelor de separare apă-țiței și gaze-țiței.

Condiția de menținere completă a presiunii este

$$\frac{dW_j}{dt} + \frac{dQ_j}{dt} B_j = \frac{dx}{dt} b_t + \frac{dx}{dt} (G_{cr} - r_t) B_t + \frac{dw}{dt} - \frac{dW}{dt} \quad (33)$$

Ea este în general compatibilă cu reinjec-tarea unei fracțiuni a gazelor extrase (după

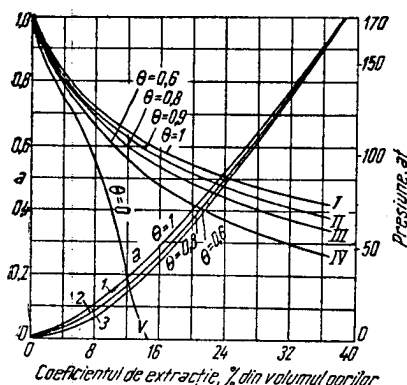


Fig. 32. Comportarea de presiune și creșterea zonei de gaze libere, α , în condiții de segregare gravitațională nestărușită a gazelor de țitei, a unui zăcămint în care se frinează scăderea presiunii prin reinjec-tarea parțială a gazelor extrase. Comportarea este cea rezultată din aplicarea ecuației (32), fiind luat ca variabilă independentă ϵ , raportul dintre volumul țiteiului extras și volumul spațiului de pori (convențional, saturația reziduală în țitei a zonei de gaze, $\bar{S}_r = 0,15$): I — curba de presiune, α — curba de mărime relativă $\bar{\alpha}$, pentru $\theta = 1$; II — curba de presiune, α — curba de mărime relativă $\bar{\alpha}$, pentru $\theta = 0,9$; III — curba de presiune; 3 — curba de mărime relativă $\bar{\alpha}$, pentru $\theta = 0,8$; IV — curba de presiune 4 — curba de mărime relativă $\bar{\alpha}$, pentru $\theta = 0,6$; V — curba de presiune pentru $\theta = 0$, 5 — curba de mărime relativă $\bar{\alpha}$, pentru $\theta = 0$.

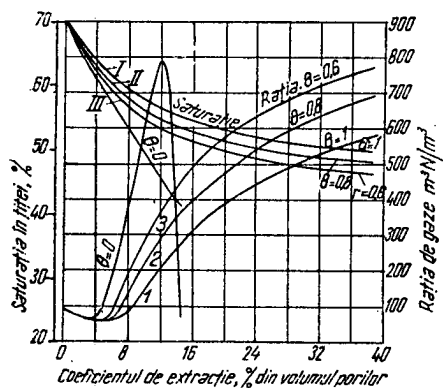


Fig. 33. Comportarea de rație de producție și de saturație în țitei a zonei de țitei, conservată prin segregarea gravitațională, a zăcămintului analizat în fig. 32. Comportarea este cea rezultată din aplicarea ecuației (32), fiind luat ca variabilă independentă raportul dintre volumul țiteiului extras și volumul spațiului de pori: I — curba de saturație, α — curba de rație, pentru $\theta = 1$; II — curba de saturație, 2 — curba de rație, pentru $\theta = 0,8$; III — curba de saturație, 3 — curba de rație, pentru $\theta = 0,6$.

prelevarea cotei indispensabile nevoilor șantie-rului), cu păstrarea unor debite de apă in-jec-tată realizabile fără presiuni de injectare exa-gerate și cu păstrarea unor viteze reduse de deplasare a apei și a gazelor, cu singura con-diție a aplicării ei nu prea tardive, înainte de amorsarea curgerii polifazice. Este recoman-dabilă încercarea ei în toate cazurile în care nu există indicii certe de incompatibilitate.

Referitor la distribuția sondelor și a debi-telor în timp și spațiu, a se vedea Capitolul VII și Capitolul II.

2. Refacerea presiunii prin injectare de apă sau de gaze se aplică zăcămintelor la care presiunea a scăzut sensibil sub presiunea de început de fierbere, în scopul restabilirii situa-ției de presiuni, de saturații și de permeabi-lități efective, în vederea realizării unui coefi-cient de extracție maxim. Ea comportă punerea în joc a unor mijloace de bază cu atît mai importante cu cît scăderea de presiune suferi-tă de zăcămint este mai importantă.

Ea nu este realizabilă din punct de vedere economic, în cazul cînd presiunea a scăzut cu mai mult decît 30...40% din valoarea pre-siunii de fierbere, îndeosebi în cazul cînd nu se poate injecta apă, deoarece cantitățile de gaze care trebuie injectate sînt foarte mari, imobilizarea lor în zăcămint este de lungă durată, capacitatea de comprimare a utilajului necesar cum și energia implicată sînt mult mai mari, iar reușita operației este în mare măsură condiționată de posibilitatea opririi producției, un timp relativ îndelungat, ceea ce, evident, este principalul impediment economic.

Ea se practică, în general, cu distribuții ale sondelor asemănătoare celor folosite la menținerea presiunii *) de care nu se deose-bește decît prin accentuarea condiției $\theta < 1$,

respectiv $\frac{dW_j}{dt} > \dots$ din ecuația (23). Alegerea

fluidului motor este determinată de aceleași criterii, cu un argument în plus în favoarea gazelor naturale de petrol, în cazul cînd pre-siunea este mult scăzută, pentru corectarea viscozității țiteiului prin reintrarea gazelor în soluție. Reintrarea efectivă a gazelor în soluție este însă determinată de întinderea și distri-buția actuală a suprafeței de separare gaze-țitei. Se pot prezenta două cazuri-limită: α) din cauza unei permeabilități generale mici, neregulate, sau (și) a unei scăderi de presiune nu prea mari, astfel încît saturația în gaze să nu fi depășit pe aceea la care gazele devin mobile (S_{cr}), gazele se găsesc încă ocluse, relativ uniform distribuite în țiteiul din porii rocii; în acest caz, reintrarea lor în soluție se efectuează relativ repede după atingerea pre-siunii necesare; sau β) din cauza unor condiții favorabile și a unei scăderi importante a pre-siunii, s-a produs o segregare gravitațională a

*) Deși adesea s-a propus fofosirea distribuției între-părșune.

gazelor din țiței, formându-se o zonă de gaze libere secundară; în acest caz, reintrarea în soluție are loc numai la contactul zonei de gaze cu zona de țiței, țițeiul din zona de contact saturându-se cu gaze și frînând puternic intrarea în soluție. Difuziunea țițeiului saturat de gaze în cel nesaturat având loc în măsură sensibilă numai la scară de timp geologică, reintrarea în soluție este practic nulă. În ambele cazuri, însă, refacerea presiunii este aproape tot atât de utilă; în cazul (α), pentru restabilirea permeabilităților efective în toată zona petroliferă, iar în cazul (β), pentru aceeași restabilire în zonele petrolifere în care a fost divizat zăcămintul prin apariția de zone secundare de gaze libere pentru lichidarea regimului de gaze în soluție și pentru înlocuirea lui cu unul de expansiune a zonelor de gaze libere, care este aproape la fel de eficace atât în cazul (α), zonă de gaze unică, cât și în cazul (β), zonă de gaze libere divizată.

Metoda prezintă, însă, o variantă de tratare în masă a zăcămintului, aplicabilă numai prin injecție de gaze, de preferință zăcămintelor cu înclinare mică, cu permeabilitate mică, dar uniformă și care au atins o epuizare relativ înaintată a energiei interne, dar cu un coeficient de extracție foarte redus. Ea constă în transformarea tuturor sondelor de extracție în sonde de injecție și în menținerea lor în această situație până la atingerea presiunii finale propuse. După o pauză de echilibrare, sondele sînt puse în producție în regim controlat. Rezultatele metodei sînt inconstante. În condiții de strat favorabile segregării gravitaționale, exploatarea selectivă a sondelor prin pakere numai din zona inferioară de țiței, însoțită eventual de injectarea de gaze numai în zona superioară de gaze, dă uneori rezultate favorabile, cîteodată chiar dacă extracția și injecția sînt practicate simultan (sub rezerva existenței în strat, la nivelul pakerului, a unei intercalații suficient de puțin permeabile față de gaze pentru a împiedica un scurtcircuit de gaze). În unele cazuri este necesară o repetată refacere a presiunii, bineînțeles cu rezultate mai reduse, atât ca producție cumulată, cât și, mai ales, ca debite.

Pentru refacerea presiunii de la o presiune P_1 la o presiune P_2 , în condiții de uniformitate a proprietăților rocii colectoare, care permit stabilirea echilibrului de presiune și de saturație, și cu încetarea extracției de gaze, de țiței și de apă din zăcămint în cursul perioadei de refacere, se poate determina cantitatea de gaze Q_j , exprimată în m^3N , necesară de injectat, ca fiind:

$$Q_j \cong \left(\frac{P_2}{z_2} - \frac{P_1}{z_1} \right) \frac{T_0}{T} \left[N \left(1 + \frac{r_0}{\gamma_a} \right) - (N - x) \left(1 - \frac{r_1}{\gamma_a} - W_2 \right) \right] + (r_0 - r_1) (N - x), \quad (34)$$

în care

γ_a este greutatea specifică aparentă a gazelor injectate intrate în soluție, kg/m^3 v. fig. 152 Cap. 4;

r_0 — rația de soluție inițială, r_1 , cea actuală, r_2 , cea finală, exprimate în acest caz în $kg\text{ gaz}/m^3$ țiței;

W_2 — volumul apei invadate, atît în perioada de exploatare primară, cît și în cursul refacerii presiunii;

T_0 și T — temperaturile absolute ale gazelor în condiții normale, respectiv de strat.

Determinarea lui $W_2 = W_I + W_{II}$, corespunzătoare celor două perioade, poate fi efectuată prin metoda ecuațiilor (23)...(26). Ecuația (34) este aproximativă și echivalentă, în principiu, ecuației de bilanț:

$$Q_j = Nu_0 \left(\frac{1}{B_2} - \frac{1}{B_1} \right) - (N - x) \cdot \left[\left(\frac{u_2}{B_2} - r_2 \right) - \left(\frac{u_1}{B_1} - r_1 \right) \right] - \left(\frac{W_2}{B_2} - \frac{W_1}{B_1} \right), \quad (35)$$

din cazul injecției de gaze, unde notațiile sînt acelea ale ecuațiilor de bilanț, iar indicii se referă respectiv:

0 — la starea inițială a zăcămintului,

1 — la starea de la începutul refacerii presiunii;

2 — la starea de la sfîrșitul refacerii presiunii.

În cazul practicării simultane a continuării extracției, cantitatea de gaze necesară devine funcție și de ritmul impus extracției în perioada de refacere, ceea ce introduce în ecuația generală de bilanț material care urmează să fie aplicată, factorii de proiectare a exploatării (v. Cap. VII).

În cazul cînd refacerea presiunii se realizează prin injectare de apă, în aceleași condiții de echilibru de presiuni și de saturații, în ipoteza întreruperii extracției în cursul refacerii, cantitatea de apă injectată este:

$$W_j = Nu_0 - W_2 - (N - x) u_2, \quad (36)$$

pentru cazul cînd refacerea este condusă pînă la presiunea P_2 , la care toate gazele reintră în soluție.

Ecuațiile (34), (35) și (36) se referă la refacerea presiunii în zăcămintele lipsite inițial ($t = 0$) de o zonă de gaze libere, cea existentă la $t = t_1$ datorindu-se exclusiv eliberării din soluție. În această situație, în cazul injectării de apă $P_2 \leq P_0 = P_f$. Inegalitatea corespunde cazului cînd între t_0 și t_1 zăcămintul a fost exploatat nerațional ($Q > r_0$), iar egalitatea, cazului exploatarei raționale ($Q = r_0$).

În cazul injectării de gaze, dimpotrivă, prin refacerea presiunii pînă la intrarea totală în soluție se obține $P_2 > P_0 = P_f$ deoarece țițeiul rămas în zăcămint la momentul t_1 trebuie să dizolve nu numai gazele libere în acel moment,

dar și gazele care urmează să ocupe volumul țiteiului extras (cu excepția cazului când o apă marginală, deosebit de activă, compensează acest deficit de volum).

Cu tot avantajul unei viscozități finale la P_2 , a țiteiului, mai mică în cazul injectării de gaze, consumul mai mare de energie, de gaze și de mijloace de bază impun o proiectare comparativ complexă, o aplicație mai costisitoare și, deseori, adoptarea soluției mixte cu injectare simultană de gaze și de apă.

3. Metode prin spălare și prin antrenare.

Metodele prin spălare și prin antrenare folosesc curgerea agentului motor prin roca colectoare, de la sondele de injecție către cele de extracție, pentru antrenarea mecanică a țiteiului rămas. Ele se aplică de obicei fie prin reluarea sau reactivarea zăcămintelor epuizate din punct de vedere energetic dar care mai au cantități apreciable de țitei, fie ca o continuare a metodelor care folosesc procese de dezlocuire, în faza finală a acestora, când procesul de dezlocuire se transformă într-unul de spălare. Adâncimea mică și saturația mare în țitei (consecință a exploatărilor vechi și neraționale) sînt factori care le fac aplicabile în bune condiții economice la multe zăcămintele vechi, cu toată cheltuiala relativ mare de energie ce o implică folosirea lor.

Alegerea fluidului motor este determinată de aceleași criterii ca în cazul menținerii presiunii, însă, din cauza cantităților mari necesare și a modului de lucru, apa este preferată*).

Pentru reducerea consumului de energie implicat de debitele mari și pentru sporirea coeficientului de extracție, atât prin sporirea fracțiunii din volumul zăcămintei efectiv, supusă spălării (v. Cap. II), cât și prin sporirea vitezelor de filtrare a agentului de spălare, se realizează distanțe cât mai scurte între sondele de injecție și cele de extracție prin alcătuirea a două rețele uniforme întrepătrunse (v. Cap. II H. a. 2 și Cap. VII B. k. 2. a) de sonde de injecție, respectiv de extracție.

a) *Spălarea cu apă.* În prima fază a aplicării metodei de spălare cu apă, cât timp apa injectată nu a ajuns în sonda de extracție, apa dezlocuiește și împinge țiteiul și gazele care, la joasă presiune, saturează predominant roca colectoare **).

Din cauza viscozității mult mai mari a țiteiului decît a gazelor, țiteiul rămîne în urma gazelor, alcătuind un «val» în fața frontului de apă, o zonă de saturație în țitei, artificial sporită, împrejurare care, dacă este rațional folosită permite realizarea unor coeficienți de extracție sporii, datorită ameliorării permeabilității efective față de țitei.

Dacă debitele de extracție nu sînt exagerate, valul se deplasează către sondele de extracție

fără deformații apreciable, producția de gaze (mică) a sondelor este, în general, întrucîtva sporită la început, aflusul de țitei se menține practic constant, pentru ca la apropierea de sonda de extracție a «valului», să crească sensibil dînd sporuri de producție însemnate, îndeosebi dacă se iau măsuri de a controla strict în această perioadă debitele, evitînd ca printr-o sporire exagerată a vitezei frontului de apă să se producă o limbă de apă care să invadeze sonda de extracție înainte de a se extrage efectiv cea mai mare parte a țiteiului adus de frontul de apă în fața sa. Dacă debitele extrase sînt mari, viteza de deplasare a frontului de apă, proporțională cu debitul-volum de fluide și invers proporțională cu distanța frontului de sonde de extracție, depășește viteza-limită de stabilitate dinamică (v. Cap. II...) a frontului și se amorsează o apofiză de apă. În continuare, aceasta se transformă în curînd într-o limbă de apă care pătrunde în sonda de extracție. Din acest moment, rația apă-țitei a sondei crește brusc, mai puțin din cauza creșterii debitului de apă, mai mult din cauza scăderii celui de țitei iar în elementul de zăcămintă drenat de sonda respectivă se instaurază un proces pur de spălare, de durată în general mult mai lungă decît prima fază (v. Cap. II, H. c. 2.). În această fază, o sporire a debitului de apă extras are drept consecință o sporire, în general, subproporțională (v. și Cap. VI C. b. 1.) a debitului de țitei, astfel încît ritmul exploatării și durata ei devin o problemă economică. În general, unor gradienti de presiune a fluidelor din roca colectoare mai mari, le corespunde un coeficient de extracție local mai mare. Din cauza variației în limite foarte largi a acestor gradienti, respectiv viteze de curgere (v. Cap. II D. a. 2) în imediata apropiere a sondei de injecție unde ei sînt mai mari, spălarea este practic totală. Cu îndepărtarea sondei de injecție, valoarea lor scade, pentru ca în anumite porțiuni ale zăcămintei, neafectate de procesul de spălare (gradienti și viteze nule) să rămîină enclave de țitei nedrenat (v. Cap. II H. a. 2.).

Forma și dimensiunile acestor enclave nu pot fi determinate decît aproximativ, cu atât mai mult cu cît ele au întinderi foarte diferite de-a lungul grosimii stratului. Cantitățile de țitei rămase nedrenate nu pot fi determinate pe această cale decît foarte aproximativ, la stratele reale de permeabilitate variată după normala la stratificație.

Considerînd stratul petrolifer ca perfect omogen din punctul de vedere al permeabilității și ținînd seama de forma frontului de apă în momentul atingerii sondei de extracție de către acesta, cu aproximația unei raze medii a frontului de apă egală cu media geometrică a semiaxelor figurii formate de frontul de apă în acel moment (v. Cap. II fig. 110) și ținînd seama de proprietățile lichidelor care curg, exprimate prin $M = \mu_a b_a / \mu_t b_t$, coeficienții

*) v. observația referitoare la saturație de la «domeniul de aplicabilitate» c. a. 3. c.

**) v. C. a. 3. c).

medii de extracție realizați în elementul dreptunghiular de zăcămint corespunzător unei perechi de sonde (sondă de extracție + sondă de injecție) sint redați de diagrama din fig. 34.

Coefficienții medii de extracție realizați în faza finală a spălării pot fi evaluați, ca ordin de mărime, cu ajutorul diagramei din fig. 6. În general, limita economică de injectare corespunde unei rații apă/țitei de ordinul a 15–20 m³/m³, sau $C \approx 93-55\%$.

Principalele căi pe care se poate realiza spörirea coeficientului general de extracție și a randamentului economic al operației sint:

1) controlul strict al vitezelor frontului de

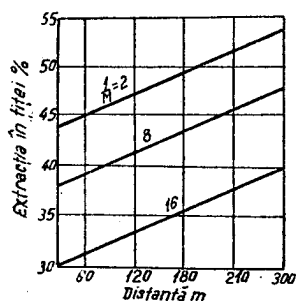


Fig. 34. Coeficienții medii de extracție în țiței dintr-un element de zăcămint realizați până în momentul răzbirii apei în sonda de extracție, în funcție de raza medie din acel moment a frontului de apă și de proprietățile lichidelor, exprimate prin $M = \mu_a b_a / \mu_t b_t$.

apă, prin repartizarea debitului între sondele de injecție, 2) controlul avansării cumulate a frontului de apă în stratele de permeabilități diferite, prin injectare și extracție selectivă cu ajutorul pakerelelor, localizind procesul de spălare în stratele saturate cu țiței, cu excluderea scurtcircuitelor prin cele saturate predominant cu apă, 3) controlul strict al presiunilor de injectare evitind fisurarea formației, care propagindu-se la distanțe mari, dă scurtcircuitate importante și 4) aplicarea mijloacelor de activarea procesului de spălare: agenți superficial activi (detergenți, microorganisme etc.), încălzirea apei, folosirea apelor sărate, mijloace încă insuficient studiate și aplicate.

Controlul avansării apei este efectuat pe baza indicațiilor sondelor de extracție, urmărind coeficientul de impurificare și detectind direct prezența apei de injecție cu ajutorul indicatorilor introduși în ea. Se folosesc în acest scop coloranți organici și diferite săruri absente în ape de strat, ușor detectabile (v. tabela 6).

Este de observat că nu totdeauna indicatorul cu concentrația de detecție cea mai redusă asigură detecția cea mai timpurie a apei de injecție, din cauza proprietăților de adsorbție ale rocii colectoare, diferite, față de diferenții indicatori. Este prudent, din această cauză, să se folosească simultan mai mulți indicatori.

Tabela 6. Indicatori folosiți pentru detecția apei de injecție în sondele de extracție

Indicatorul	Metoda de detecție	Concentrația de detecție
Coloranți comuni de anilină	Colorimetric	10^{-6}
Eozina	roșu, fluorescență galbenă	$0,5 \cdot 10^{-6}$
Fluoresceina	verde, fluorescență gălbuie	$4 \cdot 10^{-9}$
Săruri de uraniu	chimic, prin reacții de identificare	10^{-5}
Săruri de uraniu	fizice, pe baza proprietăților radioactive	10^{-9}
Izotopi radioactivi sintetici	idem	10^{-12}

Controlul debitelor de injecție prin restricție nu este eficace decât în perioada de timp apropiată (mai mult înaintea) răzbirii. După producerea acesteia, controlul are efecte relativ reduse și numai un timp relativ scurt, după care, dimpotrivă, se obțin rezultate favorabile prin activarea spălării.

b) Spălarea cu gaze este aplicată pe scară mai redusă, din cauza eficienței mai mici. Canalizările sint mai intense, din cauza raportului μ_g/μ_t mai defavorabil decât în cazul apei, cu toate că gazele, intrind parțial în soluție, reduc μ_t . Gazele nu produc nici « valul » de saturatie mărită în țiței, dat de apă. Metoda de spălare cu gaze reprezintă singurul caz cind condițiile de segregatie gravitațională ușoară constituie o împrejurare defavorabilă, înlesnind canalizarea gazelor pe la partea superioară a stratului. În acest caz este indicat să nu se practice spălarea pură prin rețele întrepătrunse, ci spălarea combinată cu dezlucuire, prin injecție în sondele situate la partea superioară a structurii și prin extracție prin sondele situate jos, pe structură. Controlul unei distribuții cit mai uniforme în strat a agentului motor este rezolvat tot prin indicatori (v. Cap. VI C. a. 1. b.)

c) Domenii de aplicabilitate a spălării cu apă sau cu gaze. Din punctul de vedere al epuizării materiale a zăcămintului de tratat, aplicabilitatea tehnico-economică a metodelor de spălare este limitată de o saturatie în țiței care să asigure un rezultat economic favorabil. Limita superioară a saturatiei în țiței nu este critică; ea este în general determinată de scăderea productivității prin celelalte metode de exploatare aplicate.

Din punctul de vedere al epuizării energice, fără a fi strict limitativă, metoda este în general rezervată din cauza costului, zăcămintelor intens epuizate, la care menținerea presiunii nu are un efect productiv, iar refacerea presiunii este economic imposibilă. În afară de aplicarea lor independentă, metodele de exploatare prin spălare-antrenare se aplică în mod ocazional ca o continuare a operațiilor

de menținere a presiunii prin injectare de apă sau de gaze, prin existența echipamentului și a instalațiilor necesare.

Afară de criteriile expuse la alegerea fluidului motor, aplicabilitatea fiecăreia dintre metodele de spălare cu apă sau cu gaze este condiționată de prezența unei saturații actuale limitate a rocii colectoare, cu fluidul de aceeași natură cu cel motor propus. Această condiție este necesară pentru ca permeabilitatea efectivă a rocii față de fluidul motor să nu fie prea mare, ceea ce ar antrena rații exagerate de

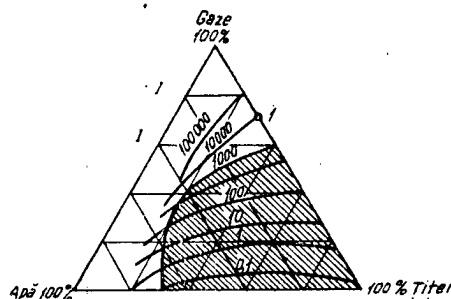


Fig. 35. Domeniile de saturație ale aplicabilității spălării cu gaze.

apă/țitei, respectiv gaze/țitei, încă de la începutul exploatarei. Dacă fiind existența unei rații-limită economică, fluid motor/țitei (de ordinul a 1 000...3 000 pentru gaze, respectiv 15...25 pentru apă), admisibilă final, este necesar ca această rație să prezinte o valoare

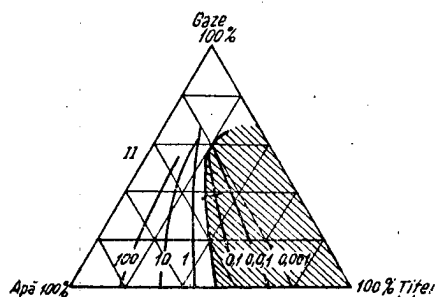


Fig. 36. Domeniile de saturație ale aplicabilității spălării cu apă.

minimă la începerea aplicării metodei respective. În conformitate cu ecuațiile de rație derivate din legile curgerii eterogene, ecuațiile (6.VI) și (4.VI) și cu condițiile economice medii, s-au trasat triunghiurile de compoziție (saturații actuale) reprezentate în fig. 35 și 36.

Curbele din fig. 35 și 36 reprezintă locurile geometrice ale punctelor reprezentative de componența saturației, în care rația gaze/țitei, respectiv apă/țitei, în producția sondelor de extracție, are aceeași valoare, iar domeniul hașurat reprezintă domeniul de aplicabilitate

al fiecăreia din metode. Acest domeniu nu este limitat, în fiecare dintre cazuri, exclusiv de condiția de rație a fluidului respectiv, ci și de rația corespunzătoare celui alt fluid, ceea ce face ca limita domeniului de aplicabilitate să nu coincidă exact cu o curbă de rație a fluidului respectiv și ca domeniul de aplicabilitate să fie mai restrâns decât cel stabilit pe baza condiției de primă aproximație a rației-limită a fluidului injectate respectiv.

Ca indicație generală, se admite că o saturație actuală de 40% cu apă constituie limita superioară de aplicabilitate a spălării cu apă. În acest caz, evident, o fracțiune cât mai mare din restul de 60% spațiu de pori, ocupată de țiței constituie un factor favorizant. În mod analog se consideră că o saturație cu gaze de ordinul a 15% constituie limita de aplicabilitate a spălării cu gaze, raportul S_g/S_a din restul de 85% volum de pori influențind (la creșterea sa) favorabil, și în acest caz, dar cu un efect mai puțin pronunțat.

Chiar în domeniul $0 < S_a < 0,4$, favorabil în principiu spălării cu apă, în gama $0,3 < S_a < 0,4$, efectul economic este relativ redus, din cauza neformării « valului » de țiței, astfel încât, dacă saturația cu gaze S_g este neglijabilă, se preconizează spălarea cu gaze.

Deși, în principiu, utilizarea ambelor fluide în porțiuni diferite (prezentînd condiții locale diferite) ale aceleiași zăcămint este indicată, ea este foarte rar folosită din cauza complicației de exploatare și costului ridicat.

b. Metode care folosesc aplicarea unei depresiuni suplimentare la fundul sondelor de extracție

1. Metoda extracției forțate constă în extracția din sonde a unor cantități totale de lichid mult mai mari decât țițeiul produs. Această metodă se poate aplica numai unora dintre zăcămintele cu bogată alimentare cu apă, îndeosebi acelor cu o permeabilitate absolută medie relativ mare. În aceste condiții, sporirea gradientului de presiune local, într-un element de rocă colectoare, intensifică uneori sensibil efectul de spălare. În condiții defavorabile, sporirea debitului de fluid extras se realizează exclusiv pe seama creșterii debitului de apă extrasă, debitul de țiței rămînînd aproximativ constant sau chiar scăzînd. În condiții favorabile, debitul de țiței crește în valoare relativă chiar mai mult decât cel de apă (coeficientul de impurificare scade).

Este de observat însă, că nu aceasta este condiția-criteriu de aplicabilitate, ci faptul că valoarea sporului de producție de țiței trebuie să depășească suplimentul de cheltuieli de extracție, datorit ridicării unei cantități mai mari de apă. În cazuri particulare, adîncimi foarte mici, condiția de aplicabilitate este satisfăcută chiar dacă prin aplicarea acestei metode coeficientul de impurificare crește.

Din cauza instabilității, într-o mică gamă de viteze de spălare, a echilibrului dinamic dintre saturațiile S_i și S_a , determinată în cea mai mare parte de neuniformitatea litologică a rocii colectoare, aplicabilitatea efectivă a metodei rămâne o problemă de încercare în fiecare caz în parte, rezultatele de laborator prin experiențe pe carote nereprezentând decât comportarea unui element izolat al zăcămintului.

Încercarea poate fi efectuată pe o singură sondă sau pe un grup mic de sonde dar numai în cazul cînd toate celelalte sonde din zăcămint *) au încetat de a mai produce. În caz contrar, extragerea unei cantități sporite de apă, chiar cu un efect productiv pozitiv, dar de mică importanță, constituie sustragerea din zăcămint a unei energii de drenare considerabile. Față de efectul favorabil de a extrage un volum de țitei de ordinul a cîteva procente din volumul de apă extras, există riscul de a părăsi prin aceasta, în alte porțiuni ale zăcămintului, cantități de țitei de ordinul a zeci de procente din volumul de apă extrasă. Din această cauză, metoda nu poate fi aplicată decât zăcămintului la care exploatarea a fost practic întreruptă sau la care debitele de țitei au scăzut în atare măsură, încît se poate trece la o aplicare a metodei în mod simultan la toate sondele, evident cu excepția unei perioade strict limitate de încercare **).

2. Metoda prin vacuum constă în extracția activată a țiteiului prin pompe de extracție fixate sub culcușul stratului productiv și a gazelor prin coloană, cu ajutorul unor exhaustoare în astfel de măsură, încît să se mențină la fața perforaturilor o presiune absolută de 0,2—0,6 ata, sensibil inferioară celei atmosferice.

Efectul ei imediat este un spor de debit al sondelor și o îmbogățire în fracțiuni grele a gazelor extrase. Sporul de debit este datorit, în mică măsură și numai la început, sporirii depresiunii disponibile pentru curgerea în strat. Sporul ulterior de producție este datorit ieșirii din soluție a hidrocarburilor $C_4 \dots C_5$ și împingerii țiteiului de către acestea. În curînd însă, după aplicare, efectele negative ale ieșirii din soluție (scăderea permeabilității efective față de țitei și îndeosebi, creșterea viscozității țiteiului) se fac simțite și depășesc efectele pozitive. Din această cauză, aplicarea metodei într-un stadiu prea timpuriu nu constituie decât o metodă de exploatare nerațională, care are sens numai din punctul de vedere al regimului capitalist: un întreprinzător, ale cărui interese total diferite de cele colective își poate permite o activare a extracției din

porțiunea de zăcămint pe care o deține, în dauna întregului zăcămint. Într-un stadiu mai înaintat al golirii zăcămintului, cînd sondele productive au fost oprite sau sînt pe punctul de a fi oprite, din cauza atingerii vîdite a limitei de exploatabilitate, aplicarea metodei prin vacuum asigură un surplus de extracție din zăcămint, uneori important. O condiție indispensabilă este aplicarea ei integrală, la toate sondele productive, deoarece altfel, surplusul de energie devenit disponibil în zăcămint ar fi cheltuit pentru mutarea locală a țiteiului, care s-ar îndepărta sub acțiunea presiunii atmosferice, de sonda căreia nu i se aplică depresiune. Efectul util al metodei este redus, din punct de vedere al extracției în țitei *), efectul fiind negativ în cazul aplicării premature. Metoda prin vacuum trebuie considerată ca o metodă de extracție suplimentară din zăcămintele foarte epuizate, a fracțiunilor benzinoase din țitei.

Efectul ei poate fi considerabil sporit printr-o combinare îngrijit proiectată cu metoda spălării cu gaze sau cu metodele termice de recuperare secundară (v. Cap. VI., C.d.1).

c. Metode de exploatare care folosesc reducerea lucrului mecanic specific de drenaj și

d. Metode de exploatare mixte, care folosesc atît reducerea lucrului mecanic de drenaj, cît și completarea energiei de zăcămint **)

În afară de completarea energiei zăcămintului cu aport extern de energie, sub forma injectării unui agent mîtor, activ din punct de vedere mecanic, dar inert din punct de vedere fizico-chimic, s-au mai propus și încercat: metode termice de recuperare secundară; spălarea cu gaze la presiune foarte redusă, reducerea viscozității țiteiului prin injectarea de CO_2 sau gaze bogate în CO_2 , folosirea agenților biologi pentru reducerea saturației remanente ș.a.

1. Metode termice. a) Metoda cu abur supraîncălzit. Prin injectarea de abur supraîncălzit în strat se realizează, în afară de un mic aport direct de energie de deplasare, o încălzire a țiteiului prin căldura sensibilă și prin căldura latentă a aburului, ceea ce produce: reducerea viscozității țiteiului, creșterea coeficientului de volum bifazic, u_1 , și a presiunii, eliberarea unei părți din hidrocarburile gazoase în soluție și, în cele din urmă o sporire a coeficientului final de extracție ϵ . Efectele utile menționate sînt comune tuturor metodelor termice. În afară de acestea, în unele roci

*) Zăcămint sau compartiment de zăcămint izolat etanș.

**) În legătură cu dinamica aplicării ei, interesul sporirii treptate a debitului extras, etc. v. « Bazele tehnologice ale metodei de extracție forțată din sondele inundate » de G. K. Maximovici. Neft. Hoz. N. 1/1954, pag. 30 ... 33.

*) Cu excepția cazului unei roci colectoare de permeabilitate deosebit de mare, situată la mică adîncime.

**) Punctele c. și d. sînt examinate în comun, ele confundîndu-se în cea mai mare parte.

colectoare, aburul ameliorează condițiile de spălare prin reducerea tensiunii de adeziune a țiteiului față de rocă. În multe alte roci, acțiunea de hidratare a materialului marnos-argilos din roca colectoare, din cauza apei de condensare, mult amplificată de temperatură, dă naștere unor efecte negative (v. Cap. VI A.b.1), atât de intense, încât drenajul devine imposibil. Din această cauză, cum și din cauza pierderilor de căldură prin transport (coloane din sondă și parcursul în strat prin zona spălată pînă la țitei), această metodă deși relativ veche, nu este aplicată decît în mod excepțional, cu toate că în condiții de laborator ea a condus la coeficienți de extracție de ordinul $\varepsilon \approx 98\%$.

b) *Metoda cu apă caldă, recentă*, este datorită unui colectiv ale cărui lucrări sînt încă în curs, în faza industrială *) Spre deosebire de agenții energetici fluizi a căror propagare este controlabilă cu ajutorul presiunii, căldura sensibilă introdusă în zăcămint nu rămîne în acesta. Din această cauză, economicitatea exploatarei impune scurtarea duratei totale a exploatarei pentru reducerea pierderilor specifice și, în orice caz, evitarea cu orice preț a opririlor în procesul de tratare termică sau a folosirii unui debit de căldură injectată, prea mic.

c) *Metoda injectării de gaze cu temperatură ridicată*, cu acțiune asemănătoare aburului, folosește gaze de naturi diferite, de obicei, gaze de combustie de la focare industriale care conțin un exces sensibil de aer. Acțiunii termice citate și acțiunii pozitive a CO_2 (reducerea simțitoare a viscozității prin intrare în soluție), i se adaugă efectul mecanic de spălare. Țiteiul extras este în parte sărăcit de benzine, care trec parțial în gazele de spălare, de unde recuperarea lor pune probleme tehnice speciale de la caz la caz, cum și probleme economice. Prezența oxigenului în contact cu țiteiul și cu roca a cărei acțiune catalitică este considerabilă în gama de temperaturi $120^\circ \dots 300^\circ\text{C}$, dă naștere uneori la efecte utile, dar de cele mai multe ori la efecte de oxidare deosebit de supărătoare. Temperatura de injectare este limitată la $\sim 500^\circ$ la gură, din considerente tehnologice (aliaje de preț compatibil cu condițiile economice ale problemei; posibilități de comprimare). Temperatura cu care gazele ajung în strat este, în general, inferioară celei de 200° , din cauza limitării temperaturii de injectare și a pierderilor termice inevitabile chiar în țevi de injectare izolate. Căldura specifică redusă a gazelor și în special cea raportată la volum și, deci și la suprafața de pierderi, face ca bilanțul termic al operației să fie relativ nefavorabil. Injectarea de gaze naturale de petrol sau metan, încălzite indirect, rezolvă favorabil problema efectului în strat, cu prețul

complicațiilor economice corespunzătoare, fiind încă în stadiul experimental.

În ansamblu, această metodă ca și metoda prin vacuum constă într-o exploatare secundară selectivă cu acțiune deosebită asupra fracțiunilor benzinoase.

d) *Metoda gazeificării țiteiului prin combustie în strat* constă în întreținerea unui focar permanent în strat, alimentat continuu prin injectare de agent comburant (aer, sau la pornire, oxigen industrial impur sau aer îmbogățit în oxigen). Pentru întreținerea focarului se montează uneori, la sabotul țevilor de injecție un arzător special, alimentat cu o mică cantitate de gaze combustibile sau de aer carburat cu benzină, ceea ce complică instalația prin necesitatea unei a doua coloane de țevi de injecție de diametru mic. Continuitatea întreținerii procesului de ardere, deși vitală pentru succesul economic al operațiilor, este greu de realizat și constituie încă una dintre greutățile de aplicare a metodei. Teoretic și experimental, în probe de laborator, procedeul constituie cel mai eficace mijloc de golire a zăcămintului, $\varepsilon \approx 100\%$. Practic, însă, din cauza neuniformității zăcămintului și a greutății întreținerii procesului de ardere cu continuitate, cum și din cauza consumării drept combustibil a unei părți din conținutul zăcămintului, efectul său economic este variabil în limite largi.

e) *Concluzii asupra metodelor termice*. Metodele termice, teoretic dintre cele mai promițătoare, nu sînt încă puse la punct pe scară industrială, constituind probleme particulare, deosebite de la zăcămint la zăcămint. În afară de efectul citat (gazeificare parțială), în unele cazuri, ele reduc aproape la zero efectul vătămător din punct de vedere al permeabilității rocilor cu granulometrie fină, de adsorbția compusilor heteropolari la suprafața rocii, pus în evidență în multe cazuri în U.R.S.S. la sondele cu declin aparent.

Efectul, întîlnit mai ales la rocile colectoare fine dar de mică adîncime, nu a fost pus în evidență încă în R.P.R., probabil din cauza lipsei de cercetări în această direcție. El constituie una dintre cauzele de eficiență a metodelor de tratament termochimic al sondelor; acesta poate fi folosit ca mijloc de detecție a efectului, însă nu dă certitudinea existenței sale decît în lipsa parafinei.

Dintre ele, cea mai promițătoare în lumina cercetărilor recente, este injectarea de apă caldă care, însă, impune neapărat investiții importante în baterii de cazane deoarece, la debite insuficiente, rezultatele economice pot fi reduse la zero.

2. *Metoda spălării cu gaze la presiune foarte redusă* constituie, uneori, o metodă de exploatare prin transformarea unei fracțiuni din hidrocarburile lichide în zăcămint, în hidrocarburi gazoase.

Din cauza dificultăților tehnico-economice

*) v. lucrările E. B. Cekaliuc, E. A. Stepanikov, K. A. Oganov și A. N. Snarski Neftianoe Hoziaistvo Nr. 1 și 2/1954 și urm.

ale recuperării lor, în special la temperatură scăzută, ea nu poate fi, practic aplicată decât în condiții particulare: folosirea ca metodă mixtă, termică, sau folosirea fără recuperare în stare lichidă a hidrocarburilor antrenate ci numai prin îmbogățirea (din punctul de vedere al puterii calorifice) a unor gaze industriale de valoare scăzută (gaze de furnal înalt, gaze cu CO), disponibile în cantități mari, de obicei în legătură și cu înmagazinarea lor temporară.

3. Metodele care folosesc acțiunea agenților biologici urmăresc în principiu, eliberarea țiteiului aderent, pe baza acțiunii unor bacterii anaerobe cu acțiune selectivă asupra compușilor eteropolarizari care provoacă adeziunea țiteiului de rocă. Neieșite încă din faza de laborator, ele vor avea o aplicație probabil limitată de faptul că țiteiul aderent direct la rocă este întâlnit în puține zăcămine și de însuși eficiență redusă a procesului.

BIBLIOGRAFIE

- BROD I.O.: Zăcămine de țitei și gaze, Editura Tehnică de Stat, Moscova, 1951.
 KRÎLOV A.P. și MURAVIEV I.M.: Exploatarea zăcămintelor de țitei, Editura Tehnică de Stat, Moscova, 1949.
 KRÎLOV A.P. ș.a.: Bazele științifice ale exploatării zăcămintelor de țitei, Editura Tehnică de Stat, Moscova, 1948.
 GAZIEV C.N. și KORHANOV I.I.: Exploatarea zăcămintelor de țitei, Editura Tehnică Științifică pentru literatura petrolului și combustibililor minerali, Baku, 1950.
 MIRCINK F.M.: Geologia industrială a petrolului, Editura Tehnică de Stat, Moscova, 1946.
 SCHELACEV V.N. și LAPUK B.B.: Hidraulica subterană, Editura Tehnică de Stat, Moscova, 1949.
 MUSKAT M.M.: Principiile fizice ale extracției țiteiului, Ed. Mc. G. Hill, New. York, 1949.
 Neftianoe Hoziaistvo: colecția 1946—1948.
 Dări de seamă ale Academiei de științe a U.R.S.S., 1948—1952.
 Petroleum Development and Tehnology, A.I.M.E., colecția 1930—1940.

BIBLIOGRAFIE RECOMANDATĂ

(ulterioară elaborării capitoului)

- APELTIN I.E.: Influența fisurării zonei de strat vecină cu sonda de injecție asupra injectivității, Nefthoz 1/1954, pag. 23 și 2/1954 pag. 15.
 AKULININ A.I.: Experiența tratamentului termochimic al sondelor la trestul Cernomor-nefti, Neft. Hoz. 4/1954, pag. 31.
 AGAEV M.: Experiența aplicării metodelor secundare de extracție a țiteiului la trestul Buzovninefti, Neft. Hoz. 9/1954, 38.
 AȘIROV K.B. și KUBANOV A.I.: Asupra menținerii presiunii în zăcămint prin reinjecția apei de zăcămint, Neft. Hoz. 5/1955, pag. 41.
 CEKALIUK E.B. ș.a.: Tratamente termice al stratelor petrolifere epuizate, Neft. Hoz. 1/1954, pag. 34 și 2/1954, pag. 33.
 CEKALIUK E.B.: Cimpul termic în strat la injecția de termofori în sonde, Neft. Hoz. 4/1955, pag. 39.
 MAXIMOVICI G.K.: Experiența fisurării hidraulice a stratelor în schemele Tatariei și Bașkiriei, Neft. Hoz. 1/1955, pag. 38.
 MAXIMOVICI G.K.: Bazele tehnologice ale metodei extracției forțate din sondele inundate, Neft. Hoz. 1/1954, pag. 30.
 MAXIMOVICI G.K.: Fisurarea hidraulică a stratelor, Neft. Hoz., 4/1954, pag. 22.
 MIRZAGIANZADE A.H. și ABASOV M.T.: Aplicarea metodelor de similitudine hidrodinamică în hidraulica subterană, Neft. Hoz. 7/1955, pag. 47.
 OGANOV K.A.: Asupra posibilității întreținerii unui focar de combustie într-un mediu poros, Neft. Hoz. 7/1955, pag. 43.
 VİBORNİH S.F.: Metoda atomilor marcați în studiul și controlul sondelor de țitei și gaze, Neft. Hoz. 7/1955, pag. 61.
 TESLIUK E.V. ș.a.: Acțiunea combinată asupra zonei de strat vecină cu sonda la fisurarea hidraulică a stratului, Neft. Hoz. 5/1955, pag. 37.
 PERMIKOV I.G.: Asupra reglajului procesului de inundare periferică a zăcămintelor de tip platformă în condiții de neuniformitate a acestuia, Neft. Hoz. 4/1955, pag. 20.
 * * * Punerea în serviciu normal a sondelor de injecție și sporirea afluxului de țitei. Culegere de rapoarte în Min. Ind. Petrolifere a U.R.S.S. Editura Tehnică de Stat, Moscova, 1953.

CAPITOLUL VII

PROIECTAREA EXPLOATĂRII ZĂCĂMINTELOR DE ȚIȚEI ȘI GAZE

A. PRINCIPIILE GENERALE ALE EXPLOATĂRII RAȚIONALE A ZĂCĂMINTELOR DE ȚIȚEI ȘI GAZE

a. Scopul exploatării raționale a zăcămintelor de țiței și gaze

Planul de Stat indică pentru țara întreagă sau pentru fiecare dintre regiunile mari ale țării o producție anumită de țiței și gaze, pentru realizarea căreia se pune la dispoziția industriei de petrol și gaze o cantitate determinată de fonduri, sub formă de mijloace de bază, materiale de consum și brațe de muncă.

Sarcina industriei de petrol este realizarea Planului de Stat printr-o exploatare rațională a zăcămintelor, adică printr-o exploatare în condiții optime, ceea ce înseamnă extracția unei cantități maxime cu un consum minim de fonduri.

O exploatare rațională a zăcămintelor se poate obține prin respectarea și coordonarea celor doi factori principali care o controlează, și anume:

- factorul hidrodinamic, care cuprinde condițiile de curgere a fluidelor prin strat, în funcție de consumul de energie care o provoacă, și
- factorul economic, care cuprinde condițiile de consum al fondurilor necesare exploatării zăcămintelor, respectiv obținerii producției planificate.

Procedeu aplicat pentru rezolvarea problemei respectării și coordonării acestor doi factori este următorul:

— Se stabilesc variantele sistemului de exploatare, raționale din punct de vedere hidrodinamic, adică variantele de exploatare care asigură un consum minim de energie pentru curgerea fluidelor în strat și în sonde. Prin sistem de exploatare se înțelege, în primul rând, geometria amplasării sondelor (gabaritul) și ordinea punerii lor în exploatare. De obicei pentru un zăcămint există mai multe variante, care îndeplinesc condițiile exploatării raționale din punct de vedere hidrodinamic.

— Pentru fiecare variantă de sistem de exploatare se stabilește efectul ei economic,

respectiv cheltuielile de fonduri, necesare exploatării zăcămintului.

— Dacă nu este la dispoziție decât un singur zăcămint se alege varianta economică optimă, care asigură realizarea planului de producție, dacă există mai multe zăcămint, producția totală planificată se repartizează pe fiecare zăcămint individual, astfel încât suma producțiilor individuale să se realizeze cu un efect economic total, optim.

Tot procedeul reprezintă deci o operație complexă, care leagă factorul hidrodinamic cu factorul economic, în vederea soluționării optime a problemei.

b. Factorul hidrodinamic la exploatarea zăcămintelor

În linii mari, experiența confirmă deducțiile Fizicii zăcămintelor și ale Hidraulicii subterane moderne, după care zona de influență a unei sonde, prin care se exploatează un zăcămint, cuprinde toată întinderea acestuia, în sensul că, datorită procesului de extracție, se produc schimbări în tot zăcămintul. Aceste schimbări privesc variația în spațiu și în timp a presiunii și variația anumitor proprietăți fizice ale zăcămintului, cum și variația distribuției fluidelor, respectiv a poziției conturilor de țiței-apă și țiței-gaze sau de gaze-apă. În funcție de aceste schimbări variază și debitul sondei. Prin urmare, din punct de vedere hidrodinamic, respectiv din punctul de vedere al exploatării, un zăcămint este de considerat ca o unitate indivizibilă, cuprinzând roca-colector și toate fluidele din ea, țițeiul, gazele și apa.

Dacă un zăcămint este exploatat prin mai multe sonde simultan, se produce o interferență între acțiunile acestor sonde, iar schimbările produse în zăcămint se prezintă ca rezultatele acțiunilor simultane ale întregului ansamblu de sonde productoare. Urmarea cea mai vizibilă a interferenței între sonde se manifestă prin aceea că debitul unui zăcămint care se exploatează printr-o singură sondă,

este altul decât debitul zăcămintului, când acesta se exploatează prin mai multe sonde.

Natura și gradul schimbărilor, și anume, variația parametrilor principali de exploatare definesc regimul zăcămintului, care cuprinde:

- variația în spațiu și în timp a presiunii;
- variația în timp a distribuției saturațiilor, cu diferitele fluide din zăcămint;
- variația în timp a rației de gaze-țitei;
- variația în spațiu și în timp a contururilor;

- variația în timp a debitului zăcămintului.

La rândul lui, regimul de zăcămint este determinat de factorii următori:

1) **Gabaritul sondelor**, caracterizat prin forma rindurilor de sonde, prin distanțele dintre rinduri și prin distanțele dintre sondele din același rind.

2) **Energia de zăcămint și purtătorii ei**, în special de acel purtător, care datorită energiei sale și proprietăților fizice ale rocii și ale fluidelor, contribuie cel mai mult la mișcarea fluidelor prin strat, spre sondele producătoare și eventual la ridicarea acestor fluide la suprafață. De fapt, denumirile regimurilor de zăcămint s-au ales, în majoritatea cazurilor, după purtătorul principal de energie; de acesta depinde și factorul de recuperare al exploatării, care, variază de la regim la regim.

3) **Ritmul de extracție**, respectiv cantitatea de fluide care se extrage din zăcămint în unitatea de timp.

Din punctul de vedere al exploatării raționale, cele mai favorabile regimuri de zăcămint sînt acelea la care se obține un coeficient maxim de extracție. Dintre cele trei regimuri principale de zăcămint, primul loc îl ocupă regimul cu împingere de apă, la care se poate atinge un coeficient de extracție de 80%, și al doilea loc îl ocupă regimul de expansiune a zonei de gaze libere, cu un coeficient de extracție de circa 60%. La cel de al treilea regim, regimul gazelor ieșite din soluție, se poate atinge numai un coeficient de extracție de maximum 30%. Primele două regimuri sînt caracterizate printr-un declin lent al presiunii de zăcămint, ceea ce constituie un consum mic de energie pentru mișcarea fluidelor în strat. Un declin foarte lent al presiunii, respectiv stabilitatea presiunii, este deosebit de important din momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut la presiunea inițială de saturație a țitei (în cazul zăcămintelor de țitei), deoarece energia gazelor care ies din soluție, în interiorul stratului, se consumă cu un randament foarte mic pentru mișcarea fluidelor.

Prin urmare, dacă un zăcămint dispune de o apă activă importantă, respectiv de o zonă de gaze libere întinsă se va stabili gabaritul sondelor, ordinea lor de punere în producție, cum și ritmul de extracție, astfel, încît exploatarea să se facă sub regimul cu împingere de apă

respectiv sub regimul de presiune a capului de gaze. În cazul cînd, la ritmul de extracție planificat pentru zăcămint s-ar produce un declin prea mare al presiunii, cu alte cuvinte, cînd purtătorul energiei principale nu poate menține regimul de zăcămint, la zăcămintele de țitei se execută o operație de menținere a presiunii de zăcămint, activîndu-se apa respectiv gazele, în mod artificial, prin injecție de apă sau de gaze, în strat. Dacă un zăcămint are, atît o zonă de apă, cît și una de gaze libere, ambele insuficient de active, se procedează uneori la o injecție de gaze în zona de gaze libere, simultană cu o injecție de apă în zona de apă.

Din punctul de vedere al exploatării raționale, regimul gazelor ieșite din soluție trebuie evitat, din cauza coeficientului mic de extracție, provocat de folosirea incompletă a energiei de zăcămint. Dacă un astfel de zăcămint conține o apă inactivă, în anumite condiții se poate instaura un regim cu împingere de apă, ori se poate crea, artificial o zonă de gaze libere, injectîndu-se gaze în partea superioară a stratului, pentru a instaura un regim de expansiune a zonei de gaze libere.

În cadrul exploatării raționale a zăcămintelor de țitei mai intră operațiile de recuperare secundară*). Aceste operații se efectuează la zăcămintele care au trecut printr-o exploatare nerațională, în urma căreia în strat au mai rămas cantități considerabile de țitei, neextrase. Apa sau gazele care se injectează printr-o rețea de sonde de injecție, distribuite pe tot zăcămintul, antrenează, în mișcarea lor prin strat, țiteiul rămas spre sondele de producție.

Cele expuse cuprind, în linii generale, măsurile prin care se ia în considerare factorul hidrodynamic la exploatarea rațională a zăcămintelor în cadrul proiectării ei. La aceasta se mai adaugă măsurile care trebuie luate pentru controlul și conducerea exploatării raționale, și anume:

— Urmărirea mersului exploatării prin stabilirea avansării contururilor, prin stabilirea evoluției presiunii în zăcămint, a rației lui de gaze și a capacității lui de producție.

— Luarea măsurilor de îndreptare, în cazul avansării neuniforme a unui contur, al canalizării apei sau a gazelor, al sondelor care produc prea multe gaze sau apă și, în general, cînd se produc anomalii în mersul exploatării, din cauza neuniformității stratului.

c. Factorul economic la exploatarea zăcămintelor

Din punctul de vedere hidrodynamic, cantitatea totală de țitei sau de gaz care se poate extrage la un anumit regim de exploatare dintr-un zăcămint, adică rezerva lui, nu depinde de numărul sondelor producătoare. Experiența

*) În sensul larg al noțiunii, v. Cap. VI.

confirmă această teorie pentru zăcămintele cu regimurile cu împingere de apă și de expansiune a zonei de gaze libere, cel puțin în limitele unor distanțe dintre sonde care nu trec prea mult peste sau sub cele obișnuite astăzi.

Limita superioară a numărului de sonde este determinată, în primul rând, de factorul economic, în felul următor: cu cât numărul de sonde este mai mare, cu atât zona de extracție a fiecărei sonde, adică partea din volumul stratului productiv, drenată de o sondă, devine mai mică. Deci numărul sondelor este limitat prin faptul că valoarea economică a rezervelor recuperabile ale zonei de drenaj a unei sonde trebuie să fie egală sau mai mare decât cheltuielile totale pentru săparea și exploatarea sondei. În același timp, numărul maxim admisibil de sonde determină distanța minimă dintre ele.

Influența factorului economic asupra numărului de sonde, respectiv asupra distanțelor dintre ele, merge însă mult mai departe. Această influență se bazează pe caracterul hidrodynamic al exploatării, datorită căruia există o relație între debitul unui zăcămint și durata lui de exploatare, pe de o parte, și numărul de sonde, pe de altă parte. Natura generală a acestei relații este reprezentată grafic în fig. 1.

Analizând curba I din fig. 1, care reprezintă debitul zăcămintului în funcție de numărul sondelor, se vede că ritmul de creștere, a debi-

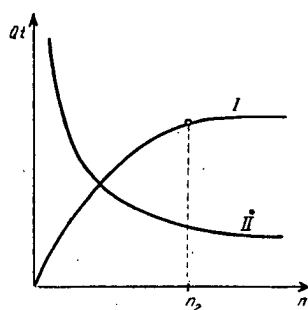


Fig. 1. Debitul unui zăcămint Q , și timpul de exploatare T , în funcție de numărul de sonde, n : curba I: $Q = f(n)$ curba II: $T = f(n)$.

tului unui zăcămint devine din ce în ce mai lent, pe măsură ce se mărește numărul sondelor, apropiindu-se asimptotic de zero; acest lucru se datorează interferenței dintre sonde. Prin urmare, depășind un anumit număr de sonde, marcat în fig. 1 prin n_2 , creșterea debitului zăcămintului, datorită numărului de sonde, devine atât de mică, încât efectul ei economic este anihilat de cheltuielile necesare pentru adăugarea sondelor peste acel număr.

Trasând pentru un anumit zăcămint, curba I, ale cărei valori absolute sînt în funcție de dimensiunile și forma zăcămintului, cum și de proprietățile lui fizice, se poate determina — și

pe această cale — limita superioară pentru numărul sondelor, n_2 .

Cu ajutorul curbei II din fig. 1, care reprezintă durata exploatării în funcție de numărul sondelor n , se pot stabili efectele economice ale exploatării pentru diferite valori de n , în special în domeniul $n < n_2$. Analizînd caracterul curbei II din fig. 1, se vede că durata exploatării scade, pe măsură ce numărul sondelor crește, ea putîndu-se determina împărțind

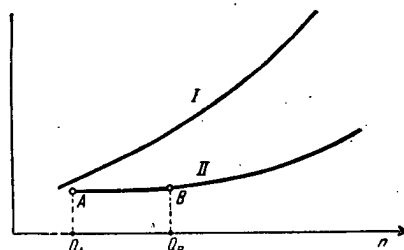


Fig. 2. Prețul de cost C , în funcție de debitele zăcămintelor Q , sau de numărul de sonde n . Domeniul exploatării raționale din punctul de vedere al costului de producție se află între debitele Q_A și Q_B .

rezerva recuperabilă a zăcămintului, care se consideră constantă, prin debitul lui. În consecință, mărind numărul sondelor, se vor mări cheltuielile pentru investiții *), în special pentru săparea și utilizarea sondelor, și în ce privește cheltuielile de extracție, acestea se vor mări într-un ritm mult mai lent, pentru că efectul numărului mărit de sonde care mărește cheltuielile de extracție, este compensat de efectul micșorării simultane a duratei de exploatare, care micșorează cheltuielile de extracție. Așa dar, cheltuielile totale de exploatare care reprezintă suma cheltuielilor de investiție și a cheltuielilor de extracție, respectiv prețul de cost care reprezintă raportul dintre cheltuielile totale și rezerva extractibilă a zăcămintului, se măresc concomitent cu mărirea numărului de sonde, respectiv cu mărirea debitului zăcămintului; caracterul general al acestei relații este reprezentat în fig. 2.

Curbele din fig. 2, care reprezintă prețul de cost, adică cel mai important indice economic, ca funcție a debitului zăcămintului, nu au punct de minimum. Deci, în mod normal nu se poate vorbi de o exploatare rațională din punctul de vedere izolat al prețului de cost, decît în cazul cînd curba are la început o creștere foarte lentă, respectiv cînd este aproape paralelă cu axa absciselor. În acest caz (v. curba II, fig. 2), o exploatare rațională din punctul de vedere al prețului de cost se poate realiza dacă debitul zăcămintului se stabilește între limitele care marchează capetele acelei părți a curbei care este aproximativ paralelă cu axa absciselor (între punctele A și B).

*) Cheltuielile specifice lei/t de țiței.

Exploatarea unui zăcămint poate fi însă considerată rațională, din punct de vedere economic, dacă se consideră drept criteriu alt indice economic, de exemplu productivitatea muncii *), care este determinată prin raportul dintre producția extrasă și munca prestată în om × zile. Valoarea acestui indice este în funcție de numărul de sonde și de aranjamentul lor geometric; curba, respectiv curbele care reprezintă aceste relații, au puncte de maximum care marchează debitele, respectiv numărul de sonde, la care productivitatea muncii are valoarea ei optimă. Deci, exploatarea care corespunde acestor puncte de maximum, se poate considera rațională în privința productivității muncii.

Dacă în vederea împlinirii Planului de Stat, care este obligatorie, există numai un singur zăcămint nou care nu poate da debitul necesar la un preț de cost minim, se poate ivi situația ca exploatarea acestui zăcămint să nu mai fie rațională din punctul de vedere al prețului de cost. Ea se consideră totuși rațională dintr-un punct de vedere economic mai general, și anume din punctul de vedere al Planului de Stat care se bazează pe economia generală a țării. În anumite condiții, situația economică a unui astfel de zăcămint se poate îmbunătăți, în cazul când chiar de la începutul exploatării — se poate executa o operație de injectare în strat. Efectul operațiilor de injectare se manifestă printr-o mărire a debitului zăcămintului, numărul sondelor rămânând același, respectiv

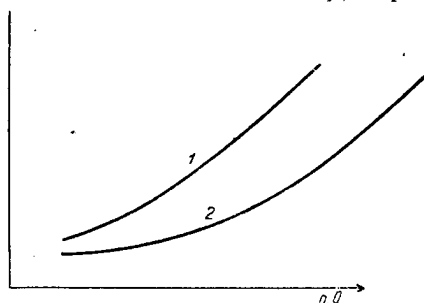


Fig. 3. Prețul de cost C al unui zăcămint în funcție de debitul unui zăcămint Q sau de numărul de sonde n : curba 1... fără injectare; curba 2... cu injectare.

printr-o micșorare a prețului de cost, deși cheltuielile totale se măresc întrucâtva, cu cheltuielile afectate operației de injectare. Caracterul general al efectului injectării este redat grafic în fig. 3. Aici curba 1 reprezintă prețul de cost, fără injectare, și curba 2, prețul de cost cu injectare, în funcție de debitul sau de numărul sondelor pentru același zăcămint.

Altfel se prezintă condițiile economice de exploatare dacă — în vederea realizării Pla-

nului de Stat — există mai multe zăcămint, cum este cazul adeseori. Se presupune întâi că există două zăcămint identice, relația dintre debit și numărul sondelor la fiecare zăcămint fiind cea indicată în fig. 4; producția planificată pentru ambele zăcămint fiind egală cu Q . Dacă această producție s-ar extrage numai dintr-unul dintre cele două zăcămint existente, numărul necesar de sonde ar fi,

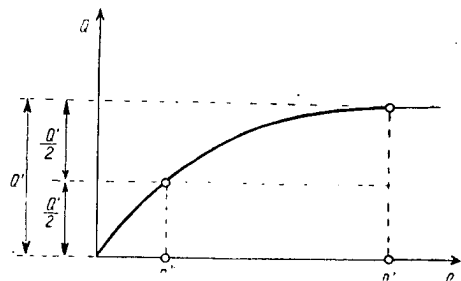


Fig. 4. Repartizarea producției planificate Q' din două zăcămint identice: $2n'' \ll n'$.

conform fig. 4, egal cu n' . Dacă însă producția Q se repartizează egal pe ambele zăcămint, numărul necesar de sonde este egal cu $2n''$. Din fig. 4 reiese clar că:

$$2n'' \ll n'.$$

Generalizând acest rezultat reiese că, prin repartizarea producției planificate pe mai multe zăcămint, în împrejurări normale, se micșorează numărul necesar de sonde. În consecință se micșorează consumul de utilaj, de muncă și de material ceea ce duce la o scădere a indicelui principal economic, adică a prețului de cost.

În realitate, zăcămintele au proprietăți diferite unul de altul, și în consecință variază și caracterul, și valorile absolute ale curbelor respective care reprezintă funcțiile

$$Q = f(n) \text{ și } C = f(n).$$

Prețul de cost depinde, în mare măsură, de dimensiunile și de proprietățile fizice ale zăcămintelor. De exemplu, acest indice crește, când crește viscozitatea fluidelor extrase și când scade permeabilitatea, sau grosimea straturilor, sau factorul de recuperare. La proiectarea exploatării simultane a mai multor zăcămint se trasează deci, pentru fiecare zăcămint, câte o curbă care reprezintă relația dintre prețul de cost și numărul sondelor. Producția totală se repartizează pe zăcămintele individuale, astfel încât media ponderată a prețurilor individuale de cost să devină minimă. În acest caz, exploatarea rațională este bazată pe respectarea factorului economic în toată amploarea lui.

d. Proiectarea exploatării raționale a zăcămintelor

Din cele expuse anterior reiese că, în cadrul proiectării exploatării raționale a zăcămintelor de țiței și gaze, întră următoarele lucrări:

*) În cadrul prezentei lucrări se admite pentru productivitatea muncii, în afară de precizare contrarie, definiția citată și nu aceea de raport dintre producția anuală și numărul de muncitori.

- Studiul caracterului zăcămintului din punct de vedere geologic, fizic și productiv. Părțile importante ale acestui studiu sînt stabilirea rezervelor și a regimului zăcămintului.
- Stabilirea bazelor hidrodinamice ale exploatării.
- Stabilirea bazelor economice ale exploatării.
- Proiectarea complexă a exploatării raționale a unui zăcămint și a mai multor zăcămine.
- Proiectarea recuperării secundare la zăcămine de țiței.

B. EXPLOATAREA RAȚIONALĂ A ZĂCĂMINTELOR DE ȚITEI

a. Stabilirea rezervelor de țiței și gaze

1. Metoda volumetrică. a) Ecuațiile rezervelor. Rezerva absolută de țiței a unui zăcămint, prin care se înțelege cantitatea de țiței pe care o conține inițial zăcămintul, se poate calcula după ecuația:

$$N_0 = F \cdot h \cdot \frac{m}{100} \cdot \frac{S_{t_0}}{100} \cdot \frac{1}{b_0} \cdot \gamma_t \quad (1)$$

în care:

- N_0 este rezerva de țiței, în t; la temperatura de 20°C și la presiunea atmosferică;
- F — suprafața zonei de țiței, în m²;
- h — grosimea medie a zonei de țiței, în m;
- m — porozitatea medie a zonei de țiței, în %;
- S_{t_0} — saturația inițială medie cu țiței a zonei de țiței, în %;
- b_0 — coeficientul de volum mediu (pe zăcămint, în condițiile inițiale) al țițeiului;
- γ_t — greutatea specifică a țițeiului, în t/m³.

Expresiile: $F \cdot h \cdot \frac{m}{100}$, respectiv

$$F \cdot h \cdot \frac{m}{100} \cdot \frac{S_{t_0}}{100}$$

reprezintă volumul de pori al zonei de țiței, respectiv volumul țițeiului în zăcămint; de aici denumirea de metodă «volumetrică».

De multe ori, stabilirea valorii pentru saturația cu țiței nu dă rezultate destul de exacte, în timp ce stabilirea saturației remanente cu apă a zonei de țiței dă valori mai precise.

În acest caz, cu ajutorul relației:

$$S_{t_0} + S'_a = 100 \quad (2)$$

se obține ecuația următoare:

$$N_0 = F \cdot h \cdot \frac{m}{100} \left(1 - \frac{S'_a}{100} \right) \frac{1}{b_0} \cdot \gamma_t \quad (3)$$

S'_a este saturația remanentă cu apă a zonei de țiței, în %.

Valoarea lui N_0 reprezintă rezerva de țiței absolută a zăcămintului. Din ea se poate extrage numai partea determinată prin coeficientul de extracție tehnic, caracteristic regimului de exploatare existent. Această parte a rezervei de țiței absolute, rezerva tehnică a zăcămintului, se stabilește după ecuația:

$$N_{0t} = N_0 \cdot \varepsilon_t = F \cdot h \cdot \frac{m}{100} \cdot \frac{S_{t_0}}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{b_{t_0}} \cdot \varepsilon_t \quad (4)$$

în care:

N_{0t} este rezerva de țiței tehnică, în t;

ε_t — coeficientul de extracție, tehnic.

Uneori nu este posibil să se extragă nici toată rezerva de țiței tehnică, deoarece debitul scade atât de mult spre sfîrșitul exploatării, încît aceasta devine neeconomică. În acest caz, rezerva de țiței economică se determină cu ecuația:

$$N_{0e} = N_0 \varepsilon_e = F \cdot h \cdot \frac{m}{100} \cdot \frac{S_{t_0}}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{b_{t_0}} \cdot \varepsilon_e \quad (5)$$

în care:

N_{0e} este rezerva de țiței economică, în t;

ε_e — coeficientul de extracție economic, cu observația că $\varepsilon_e < \varepsilon_t$.

Exploatarea rațională modernă tinde spre o extracție cît mai completă a țițeiului, deci în practică, se consideră:

$$\varepsilon_e = \varepsilon_t = \varepsilon. \quad (6)$$

Rezerva de gaze dizolvate în țițeiul unui zăcămint se află cu ecuația:

$$V_s = N_0 r_0 \quad (7)$$

în care r_0 este rația inițială de soluție a gazelor în țiței.

Dacă zăcămintul are o zonă de gaze libere, rezerva lui de gaze se calculează cu ecuația:

$$V_0 = F_g \cdot h \cdot \frac{m}{100} \cdot \frac{S_{g_0}}{100} \cdot \frac{1}{B_0} \quad (8)$$

în care:

V_0 este rezerva de gaze din zona de gaze libere în m³N;

S_{g_0} — saturația inițială cu gaze a zonei de gaze libere, în %;

F_g — suprafața zonei gazeifere (a zonei inițiale de gaze libere) în m²;

B_0 — coeficientul de volum, inițial al gazelor.

$$B_0 = \frac{Z(t + 273^\circ)}{273 p_0} \quad (9)$$

în care:

Z este factorul de abatere al gazelor din zăcămint de la legea gazelor perfecte;

t — temperatura zăcămintului, în °C;

p_0 — presiunea inițială medie a zăcămintului, în ats.

Introducând în ecuația (8), pentru B_0 valoarea din ecuația (9), pentru rezerva de gaze a zonei de gaze libere se obține ecuația:

$$V_0 = F_g \cdot h \cdot \frac{m}{100} \cdot \frac{S_{g_0}}{100} \cdot \frac{273 p_0}{(273 + t^0)} \quad (10)$$

Practic, în ecuația rezervei zonei de gaze libere nu se introduce un coeficient de extracție, pentru că extracția gazelor din zona de gaze libere se poate face prin erupție, deci în mod economic, pînă ce presiunea p scade la circa 1 ata.

Dacă în locul saturației cu gaze se cunoaște saturația remanentă cu apă a zonei de gaze libere, calculul rezervei se face cu ecuația:

$$V_0 = F_g \cdot h \cdot \frac{m}{100} \left(1 - \frac{S_a}{100}\right) \cdot \frac{273}{273 + t^0} \cdot \frac{p_0}{Z} \quad (11)$$

Rezerva totală de gaze a unui zăcămint cu zonă de gaze libere este deci:

$$V_0 + V_1 = N_0 r_0 + F_g \cdot h \cdot \frac{m}{100} \left(1 - \frac{S_a}{100}\right) \cdot \frac{273}{273 + t^0} \cdot \frac{p_0}{Z} \quad (12)$$

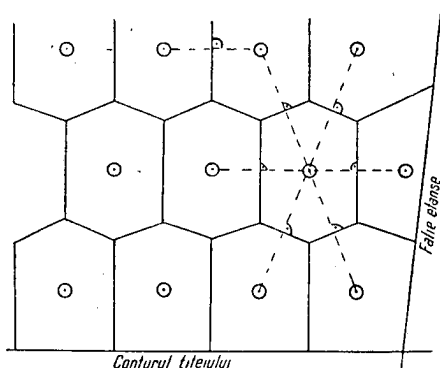


Fig. 5. Determinarea zonelor de drenaj ale sondelor.

b) Parametrii din ecuațiile rezervelor. Grosimea medie a zonei de țitei se poate determina din ecuația:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (13)$$

în care:

- h este grosimea medie a zonei de țitei, în m;
- h_i — grosimea zonei la sonda i , în m;
- F_i — suprafața «poligonului de drenaj» al sondei i , în m^2 ;
- n — numărul de sonde.

Un exemplu pentru determinarea poligoanelor de drenaj pentru un gabarit dat, este prezentat în fig. 5. Grosimea zonei la o sondă i se măsoară pe verticală. Ea cuprinde

numai straturile colectoare de țitei, deci nisipurile curate și puțin marnoase, cum și gresiile și se stabilește, fie cu ajutorul carotajului electric sau al celui mecanic, fie prin deducție,

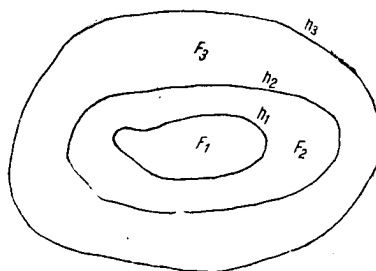


Fig. 6. Determinarea volumului zonei de țitei cu ajutorul izopacelor.

din observațiile făcute la sondă asupra merului sapei (în special asupra vitezei de avansare).

$F \cdot h$ — Volumul de rocă colectoare al zonei de țitei, adică valoarea expresiei $F \cdot h$ din ecuațiile rezervelor, se poate obține cu ajutorul unei hărți cu izopace (linii de egală grosime a stratului), v. fig. 6. Calculul volumului zonei de țitei se face cu ecuația:

$$F \cdot h = F_1 h_1 + F_2 \cdot \frac{h_1 + h_2}{2} + F_3 \cdot \frac{h_2 + h_3}{2} + \dots \quad (14)$$

Determinând astfel volumul zonei de țitei, nu mai este necesar, să se stabilească grosimea medie a stratului. — Porozitatea medie a zonei de țitei se poate stabili în felul următor:

La sonda i , porozitatea medie a stratului se stabilește după ecuația:

$$m_i = \frac{\sum_{j=1}^{a_i} \Delta_j h_j \cdot m_j}{\sum_{j=1}^{a_i} \Delta_j h_j} \quad (15)$$

în care:

- m_i este porozitatea medie a stratului la sonda i ;
- a_i — numărul de carote extrase la sonda i ;
- $\Delta_j h_j$ — intervalul de adâncime din care s-a scos carota j ;
- m_j — porozitatea carotei j (v. fig. 7).

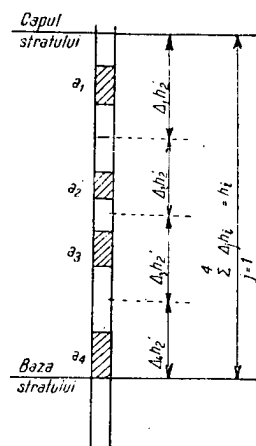


Fig. 7. Determinarea porozității medii a stratului la sonda i .

Porozitatea medie pe tot stratul se stabilește după ecuația:

$$m_i = \frac{\sum_{i=1}^n F_i h_i \cdot a_i}{\sum_{i=1}^n F_i h_i} \quad (16)$$

în care:

m este porozitatea medie a zăcămintului;
 F_i — zona de drenaj,
 h_i — grosimea stratului, } la sonda i ;
 m_i — porozitatea medie,
 n — numărul de sonde.

2. Metoda declinului de producție. Metoda aceasta permite calculul producției viitoare a unui zăcămint, respectiv a unei sonde, dacă se cunoaște declinul producției, în funcție de timp. Declinul producției este definit prin ecuația:

$$d_i = \frac{q_{i-1} - q_i}{q_{i-1}} \cdot 100 \quad (17)$$

în care:

d_i este declinul producției în luna i , în %
 q_i — producția medie zilnică în luna i ;
 q_{i-1} — producția medie zilnică în luna precedentă, $i - 1$.

Pentru cazul special cînd

$$d_i = \text{constant} = d, \quad (18)$$

debitele zilnice în lunile consecutive sînt termenii unei progresii geometrice, și se obțin următoarele ecuații simple:

$$q_n = q_1 \left(1 - \frac{d}{100}\right)^{n-1} \quad (19)$$

în care:

q_1 este debitul mediu zilnic în prima lună, respectiv în luna de la care pornește calculul;
 q_n — debitul mediu zilnic în luna n , numărînd de la luna de la care pornește calculul

și:

$$N_n = 30,42 q_1 \frac{1 - \left(1 - \frac{d}{100}\right)^n}{1 - \left(1 - \frac{d}{100}\right)} \quad (20)$$

în care:

N_n este cantitatea de țiței care se va extrage total, începînd cu luna 1 și terminînd cu luna n (în n luni);

$$30,42 = \frac{365}{12} - \text{numărul mediu de zile ale unei luni, în decursul unui an.}$$

Ecuațiile (17) și (18) sînt valabile pentru orice interval de timp în care declinul producției

are o valoare constantă. Deci, dacă un zăcămint are în luna a 11-a a exploatării un debit mediu zilnic de 200 t, și declinul producției este constant și egal cu 4%, pînă în luna a 25-a inclusiv, exponentul n din ecuațiile (19) și (20) este egal cu 15; debitul mediu zilnic în a 25-a lună va fi egal cu

$$200 \left(1 - \frac{4}{100}\right)^{14}$$

și producția totală a zăcămintului, pe intervalul dintre luna a 11-a și luna a 25-a, inclusiv, va fi egală cu

$$30,42 \cdot 200 \frac{1 - \left(1 - \frac{4}{100}\right)^{15}}{1 - \left(1 - \frac{4}{100}\right)} = N_{11 \dots 15}.$$

Constanța declinului de producție se recunoaște mai ușor grafic, după caracterul curbelor de declin, care se obțin dacă într-un sistem de coordonate se trec drept ordonate valorile logaritmilor debitelor medii zilnice, pe luni și drept abscise, numărul de luni consecutive. Dacă declinul este constant, curba care rezultă este o linie dreaptă, conform ecuației deduse din ecuația (19):

$$\log q_n = \log q_1 + (n - 1) \log \left(1 - \frac{d}{100}\right)$$

v. și fig. 8.

Producția viitoare a unui zăcămint, respectiv a unei sonde, din luna cînd debitul zilnic este egal cu q_1 și pînă la completa epuizare, cînd debitul scade la zero, se calculează din ecuația (20), introducînd în ea $n = \infty$. În acest caz, ecuația (20) ia forma:

$$N_\infty = 30,42 \frac{q_1}{d}. \quad (21)$$

În realitate, interesează numai producția viitoare pînă la limita economică q_e , care este definită prin acel debit zilnic, la care costul exploatării depășește valoarea economică a țițeiului extras. Această producție viitoare se calculează după ecuația:

$$N_e = 3042 \frac{q_1 - q_e}{d} \quad (22)$$

în care:

q_1 este debitul mediu zilnic în luna de la care începe calculul, în tone/zi;
 q_e — limita economică în tone/zi;
 d — declinul lunar de producție, în %;
 N_e — producția viitoare, din momentul cînd începe calculul și pînă la atingerea limitei economice, în tone.

La un moment dat, cunoscînd cantitatea de țiței extrasă dintr-un zăcămint x și calculînd producția lui viitoare, pentru cazul declinului

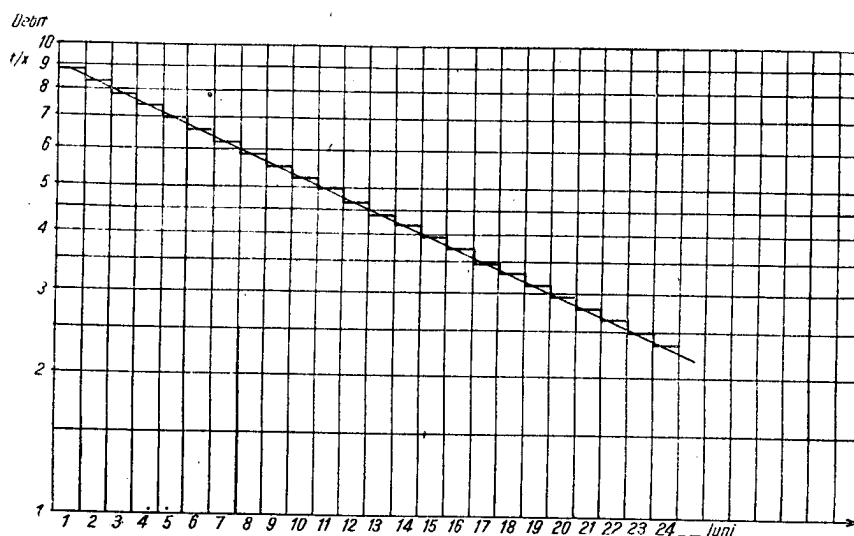


Fig. 8. Curba de producție cu declin constant.

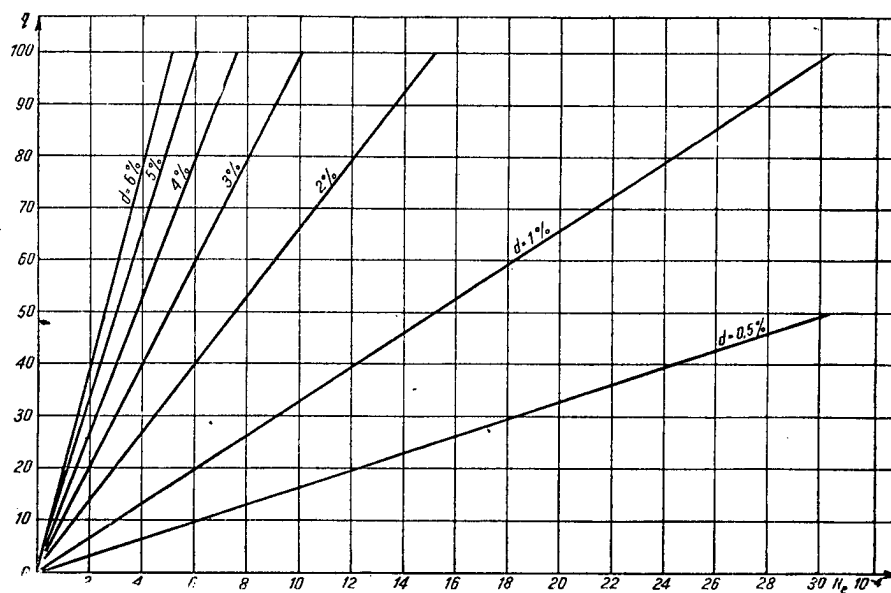


Fig. 9. Relația dintre producția viitoare economică N_e și debitul inițial, micșorat cu limita economică $q_l - q_e$, la diferite valori ale declinului.

constant, N_e rezerva inițială de țiței a zăcămintului se poate stabili după ecuația:

$$N_0 = N_e + x = 3042 \frac{q_1 - q_e}{d} + x. \quad (23)$$

Pentru calculul practic se pot folosi diagramele din fig. 9, 10, 11, 12, 13, și 14.

Fig. 9 reprezintă relația

$$q_1 - q_e = f(N_e)$$

pentru diferite valori ale declinului d . Diagramele servesc la determinarea producției viitoare, dacă se cunosc debitul inițial, limita economică și declinul de producție.

Fig. 10-14 reprezintă relația:

$$q_1 = f(\tau)$$

pentru τ diferite valori ale declinului d , în care este numărul lunilor de producție care vor trece de la luna în care debitul este q_1 , până la luna când debitul scade la limita economică. În fig. 10, 11, 12, 13 și 14, limitele economice s-au luat de 1, respectiv 2, respectiv 3, respectiv 4, respectiv 5 t/zi. Diagramele servesc, în primul rând, la stabilirea duratei viitoare economice de exploatare, dacă se cunosc debitul inițial, limita economică și declinul de producție.

3. Metoda bilanțului material.

Metoda bilanțului material se folosește mai mult pentru controlul și verificarea valorii rezervei zăcămintelor, găsită prin metoda volumetrică sau prin metoda declinului. Cum reiese din structura lor, ecuațiile de bilanț material (v. cap. V G. b și Cap. VI. B. a. b' c și d.) nu pot fi folosite decât în cazul când se cunoaște o parte a evoluției zăcămintului respectiv variația parametrilor care intră în acele ecuații, cum și în anumite condiții de simplificare a proceselor reale care au loc în zăcămint.

Cele trei ecuații de bază care se pot folosi pentru calculul rezervelor de zăcămint sunt:

$$N[(r_0 - r_t)B_t - (b_0 - b_t)] + V_0(B_t - B_0) = x[b_t + B_t(G - r_t)] - W + w \quad (24)$$

$$N \left[ab_0 \left(\frac{B_t}{B_0} - 1 \right) + B_t(r_0 - r_t) - (b_0 - b_t) \right] = x[b_t + B_t(G - r_t)] - W + w \quad (25)$$

$$N \cdot a \cdot u_0 \left(\frac{B_t}{B_0} - 1 \right) + N(u_t - u_0) = x[u_t + B_t(G - r_0) - W + w] \quad (26)$$

în care *)

- N este volumul de țiței mort, inițial în zăcămint, în condiții standard, în m^3 ;
- x — volumul de țiței, cumulativ extras din zăcămint, la un moment dat;
- W — volumul de apă, cumulativ intrat în zăcămint, la un moment dat;
- w — volumul de apă extras, cumulativ;
- V_0 — volumul inițial al gazelor din zona de gaze libere în condiții standard în m^3 ;

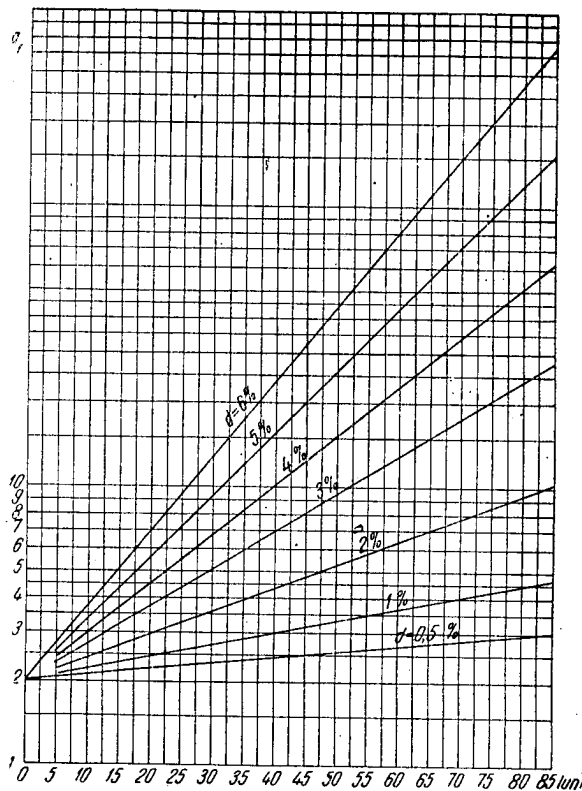


Fig. 10. Relația dintre debitul inițial q_1 și durata de exploatare, până la atingerea limitei economice $q_e = 1$, pentru diferite valori ale declinului d .

- r_0, r_t — rația de soluție a țițeiului, inițial, respectiv la un moment dat;
- b_0, b_t — coeficientul de volum (monofazic) al țițeiului, inițial, respectiv la un moment dat;
- G — rația cumulativă de gaze, la un moment dat, adică raportul dintre volumele de gaze și țiței, extrase ambele cumulativ;

*) Este de observat ca ecuațiile (24), (25) și (26) nu sînt distincte astfel încît nu pot servi la rezolvarea față de N , V_0 și W într-un același moment al exploatarei.

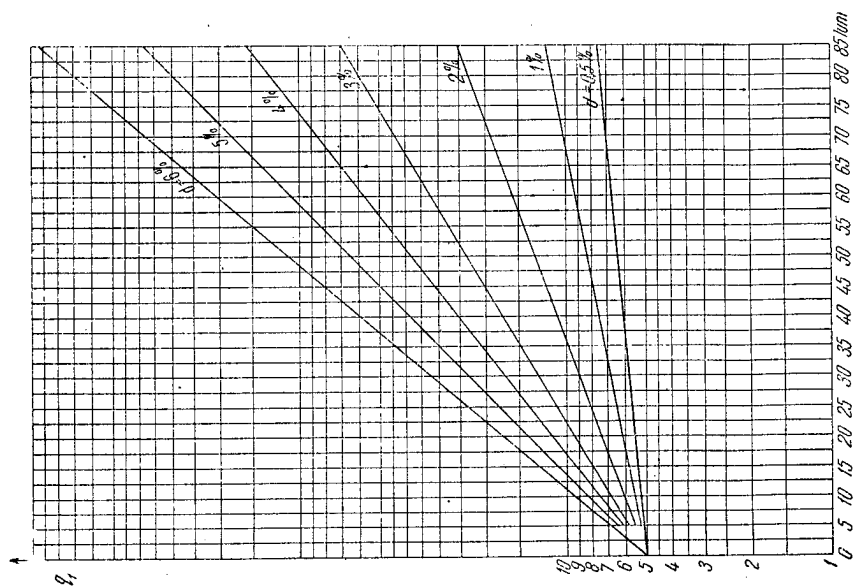


Fig. 12. Relația dintre debitul inițial q_1 și durata de exploatare pînă la atingerea limitei economice $q_e = 3$, pentru diferite valori ale declinului d .

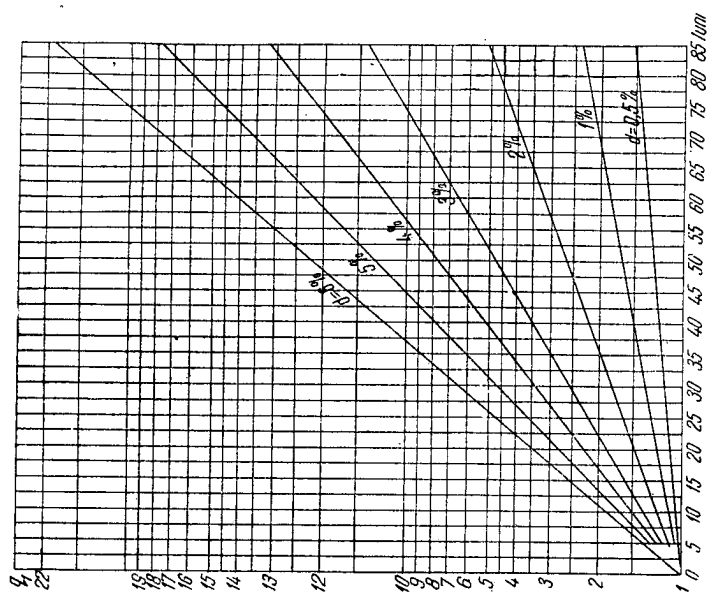


Fig. 11. Relația dintre debitul inițial q_1 și durata de exploatare pînă la atingerea limitei economice $q_e = 2$, pentru diferite valori ale declinului d .

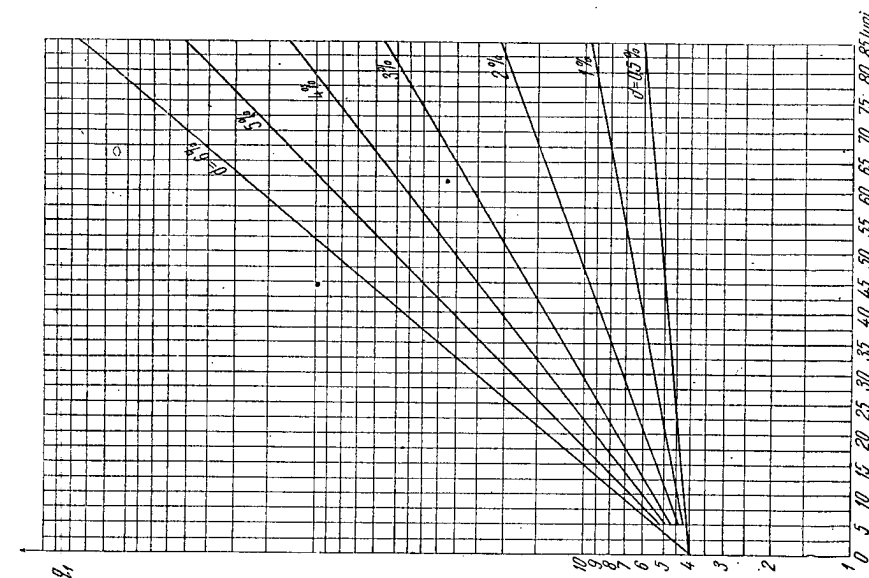


Fig. 14. Relația dintre debitul inițial q_1 și durata de exploatare până la atingerea limitei economice $q_e = 5$, pentru diferite valori ale declinului d .

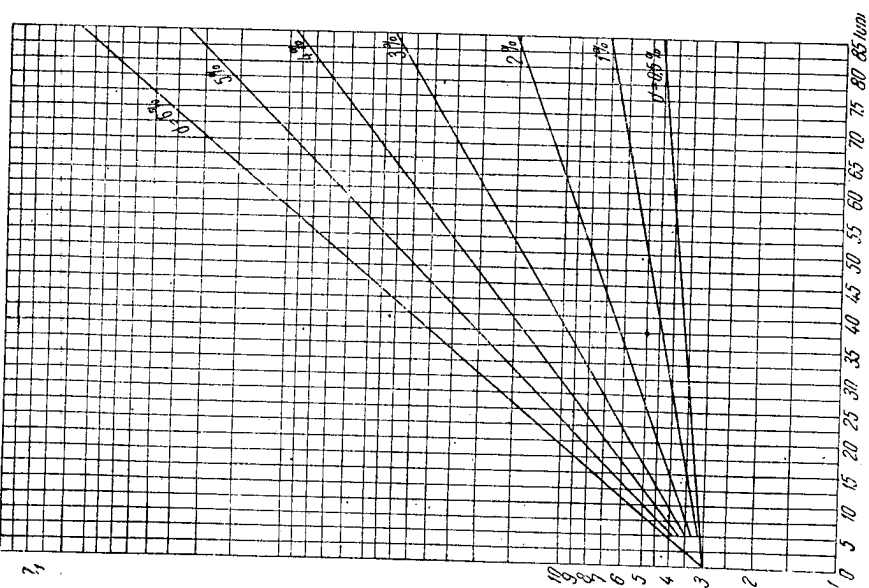


Fig. 13. Relația dintre debitul inițial q_1 și durata de exploatare până la atingerea limitei economice $q_e = 4$, pentru diferite valori ale declinului d .

a — raportul dintre volumul spațiului poros al zonei de gaze libere și al zonei de țiței (inițial).

$$u_0 = b_0 \text{ și } u_t = b_t + B_t (r_0 - r) \quad (27)$$

— coeficienții de volum bifazici.

Dintre cele trei necunoscute N , V_0 și W a căror valoare se poate stabili cu ajutorul ecuațiilor (24)–(26), valoarea apei intrate cumulativ în zăcămint, W se determină de obicei prin alte metode (v. Cap. V G. b. și Cap. VI B. a. b. c. și d.).

Cele două necunoscute care mai rămân, N și V_0 se pot stabili în cazul cînd în ecuația (24) se introduc, pentru parametrii r_t , b_t , B_t , x , W și G , valorile respective, în două momente date în exploatarea zăcămintului, rezolvînd ecuațiile care rezultă astfel, în raport cu N și V_0 .

Dacă se mai cunoaște valoarea a așa cum se întîmplă uneori ca rezultat al forajelor de explorare și exploatare, numărul de necunoscute se reduce la una singură, N care teoretic s-ar putea găsi din ecuația (25) sau (26), introducîndu-se în ea o singură dată parametrii exploatarei la un anumit moment.

Practic, ecuațiile (24), respectiv (25), (26) se rezolvă pentru mai multe momente ale exploatarei, introducînd parametrii de exploatare respectivi, și din valorile pentru N respectiv V_0 găsite astfel, se formează valori medii sau se aleg acele valori care, din observațiile făcute sau în conformitate cu cifrele găsite prin alte metode, se apropie eventual mai mult de realitate.

Pentru stabilirea rezervei industriale a zăcămintului, valorile pentru N respectiv V_0 astfel găsite, trebuie înmulțite cu coeficientul de extracție care se poate obține la regimul de exploatare aplicat.

b. Regimul zăcămintului de țiței

1. Rolul regimului de zăcămint. Proiectarea și conducerea exploatarei raționale a zăcămintelor de țiței au ca obiectiv principal menținerea, respectiv instaurarea unui regim de zăcămint din care să rezulte un coeficient maxim de extracție, cu un conșum minim de energie. În consecință interesează, în primul rînd, comportarea din punct de vedere productiv a zăcămintului, care este caracterizată în special de variația presiunii de zăcămint și a rației de gaze, în funcție de coeficientul de extracție. Purtătorul de energie (țiței, gaze, apă, rocă-colector) și forma energiei (de compresie, gravitațională) produc mișcarea fluidelor în zăcămint. Cunoașterea lor determină metodele care trebuie aplicate pentru proiectarea și conducerea exploatarei raționale.

În lumina celor expuse anterior, cele 13 regimuri de zăcămint (v. Cap. V) pot fi grupate în patru regimuri de bază.

2. Regimul cu împingere de apă. Acest regim cuprinde regimurile întreținute cu îm-

pingere de apă, cu contur fix sau mobil, create de apa de zăcămint, marginală sau de talpă, cu contur mobil sau fix, fie că această apă aflurează la suprafață unde este mereu alimentată de surse exterioare, fie că apa este închisă în zăcămint, avînd însă un volum foarte mare față de volumul țițeiului.

Exploatarea zăcămintului sub acest regim este determinată de avansarea apei de zăcămint care umple, fără întîrziere și la o presiune practic constantă, spațiul poros evacuat de țiței.

Variația presiunii de zăcămint, p , și a rației de gaze, G_{cr} , în funcție de coeficientul de extracție e , în cursul exploatarei, sub regimul cu împingere de apă, este redată schematic în

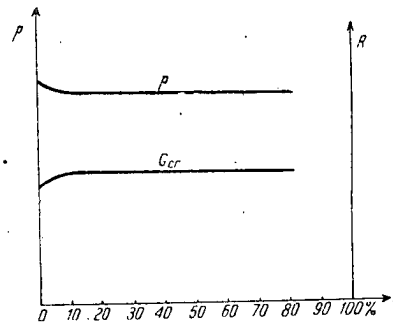


Fig. 15. Variația presiunii de zăcămint, p , și a rației de gaze G_{cr} , în funcție de coeficientul de extracție e , la regimul cu împingere de apă.

fig. 15. Presiunea zăcămintului se stabilizează, după un timp relativ scurt de la începutul exploatarei, la o valoare constantă, deci și rația de gaze se stabilește în mod corespunzător, la o valoare constantă. Practic, această situație se obține prin controlul ritmului de extracție, care nu trebuie să depășească posibilitățile de avansare prin strat a apei care înlocuiește țițeiul evacuat. La rîndul lor aceste posibilități depind de proprietățile fizice ale zăcămintului, de presiunea și de dimensiunile lui.

Exploatarea unui zăcămint cu regim cu împingere de apă este terminată în momentul cînd conturul de țiței a ajuns pînă la ultimul rînd de sonde, respectiv cînd toată zona de țiței a fost inundată de apă. Coeficientul de extracție este relativ mare, ajungînd uneori pînă la 80%, datorită caracterului procesului de deslocuire a țițeiului, specific apei, (v. Cap. V).

În zăcămintele cu «regim elastic», fie el «pur elastic», fie «elastic de tip gravitațional cu împingere de apă», presiunea scade în cursul exploatarei, în cazul cînd presiunea a scăzut sub presiunea inițială de fierbere a țițeiului, rația de gaze începe să crească, ceea ce duce la o înrăutățire a randamentului de extracție, respectiv a coeficientului de extracție,

În tehnica modernă de exploatare se procedează la executarea unor operații de menținere a presiunii acestor zăcămintele, injectând în ele apă, dincolo de conturul țitei-apă. În acest fel se creează, în zăcămint, un regim cu împingere artificială de apă, al cărui caracter productiv este cel prezentat în fig. 15. Rezultatul operației de menținere a presiunii zăcămintului este menținerea unui ritm intens de extracție a țiteiului datorit măririi puterii de avansare a apei prin strat.

Zăcămintele de țitei cu regim natural cu împingere de apă se găsesc rar. În R.P.R. nu există, în prezent, nici unul; există însă zăcămintele la care acest regim este creat în mod artificial, prin injectare de apă.

La zăcămintele sub regimul cu împingere de apă și cu apă marginală (cu contur țitei-apă, mobil), limita sistemului hidrodinamic, compus din țitei, apă și mediul poros, formează conturul de alimentare. La zăcămintele cu regim natural cu împingere de apă, conturul de alimentare este — în cazul zăcămintelor deschise — aflorimentul stratului și în cazul zăcămintelor închise, acest contur de alimentare este format de limita exterioară a apei. La zăcămintele cu apă marginală, la care se execută o operație de injectare, rolul conturului de alimentare îl are rîndul sondelor de injectie. Proiectarea exploatării acestor zăcămintele este accesibilă unui calcul relativ ușor.

3. Regimul de expansiune a gazelor.

a) Regimul de expansiune a zonei de gaze libere.

În mod obișnuit, raportul dintre volumul zonei de gaze libere al unui zăcămint și volumul zonei de țitei este cu mult mai mic decât raportul dintre volumul zonei de apă și volumul zonei de țitei, la zăcămintele cu regim cu împingere de apă. Avînd în vedere și faptul că, în zăcămintele cu regim cu împingere de apă, presiunea inițială de zăcămint depășește, adeseori, considerabil presiunea de început de fierbere a țiteiului, în timp ce la zăcămintele cu regim de expansiune a zonei de gaze libere, presiunea inițială este, cel puțin teoretic, egală cu presiunea de început de fierbere a țiteiului, reiese că exploatarea zăcămintelor, la care gazele din zona de gaze libere au rolul agentului motor principal, este caracterizată printr-o scădere mai mult sau mai puțin accentuată a presiunii și printr-o creștere corespunzătoare a rației de gaze. Prin operații de menținere a presiunii de zăcămint, teoretic ar fi posibil să se mențină presiunea zăcămintului la valoarea ei inițială. În acest scop ar trebui să se injecteze, în strat, mai multe gaze decât se extrag. Practic însă nu se injectează (decît rar) nici chiar toate gazele extrase, o parte din acestea fiind întrebuințate în schele, drept combustibil.

Ținînd seamă de realitatea acestor condiții, în regimul de expansiune a zonei de gaze libere sînt cuprinse toate regimurile cu «împingere de gaze», atît cele «întreținute», cît și cele «elastice», cum și cele cu contur fix. Cazul

regimului «întreținut și cu împingere de gaze», la care presiunea de zăcămint rămîne constantă în cursul exploatării, așa cum se întîmplă la regimul cu împingere de apă, formează deci un caz special în cadrul regimului de expansiune a zonei de gaze libere.

Variația presiunii de zăcămint, p , și a rației de gaze, R , în funcție de coeficientul de extracție, ϵ , în cursul exploatării sub regimul de expansiune a zonei de gaze libere este redată

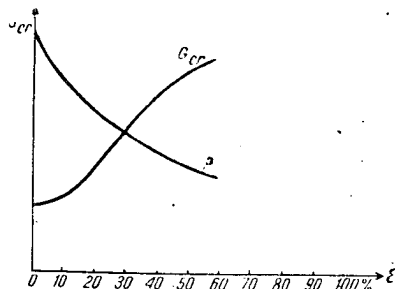


Fig. 16. Variația presiunii de zăcămint p , și a rației de gaze G_{cr} , în funcție de coeficientul de extracție ϵ , la regimul de expansiune a zonei de gaze libere.

schematic în fig. 16. Exploatarea unui astfel de zăcămint se termină la inundarea completă cu gaze a zonei de țitei, așa dar cînd conturul țitei-gaze a ajuns la ultimul rînd de sonde, Coeficientul de extracție ajunge pînă la valoarea de 60%, deci în mod normal nu atinge valoarea maximă care se poate obține la exploatarea sub regimul cu împingere de apă. Față de rezultatele lucrărilor experimentale, la care spălarea în laborator a unei carote cu gaze a dat un coeficient de extracție de țitei egal sau uneori chiar mai mare decât spălarea cu apă, extracția industrială de țitei provoacă în zăcămint o serie de procese complicate, și anume: din cauza scăderii continue a presiunii, în zăcămint se produce permanent o eliberare de gaze din soluție. Deoarece în practică, ritmul de extracție este de obicei mai intens decât acela la care se poate produce o separare gravitațională completă între țitei și gaze, în zăcămint, o parte din acestea din urmă migrează împreună cu țiteiul spre găurile sondelor. Afară de aceasta, din cauza diferenței foarte mari dintre viscozitatea gazelor și a țiteiului, gazele din zona de gaze libere se canalizează în zona de țitei, acționînd în același mod cu gazele ieșite din soluție. În consecință, conturul de țitei-gaze nu avansează pe un front strict uniform, iar coeficientul de extracție este mai mic decât la regimul cu împingere de apă, unde avansarea conturului țitei-apă se poate dirija în condiții mai favorabile. Operațiile de menținere a presiunii de zăcămint prin injectare de gaze ameliorează această situație și măresc randamentul exploatării, permițînd totodată un ritm de extracție mai intens.

Multe zăcăminte de țiței din România au înclinări relativ mari ale stratului petrolifer. Din această cauză ele au un contur de separație între țiței și gaze mobil și asemănător cu cel al zăcămintelor cu apă marginală. La

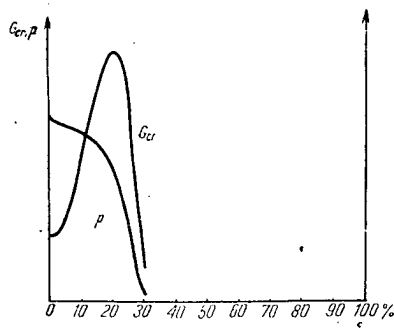


Fig. 17. Variația presiunii de zăcămint p și a rației de gaze G_{cr} , în funcție de coeficientul de extracție ε , la regimul de gaze din soluție.

zăcămintele cu formă circulară de zonă de gaze libere, conturul de alimentare se reduce — teoretic — la un punct, centrul zonei finale de gaze. În practica proiectării exploatării acestor zăcămint, drept contur de alimentare se ia conturul de țiței-gaze, neglijând astfel variația de presiune din zona de gaze libere, ceea ce este admisibil, avînd în vedere că această variație este foarte mică, datorită viscozității relativ mici și greutateii specifice foarte mici a gazelor. De asemenea și la zăcămintele liniare (în formă de bandă), conturul de țiței-gaze se consideră drept contur de alimentare.

b) Regimul de gaze din soluție. Variația presiunii de zăcămint, p , și a rației de gaze, G_{cr} , în funcție de coeficientul de extracție ε , în cursul exploatării sub regimul de gaze din soluție, este redată schematic în fig. 17 (v. detalii la Cap. V. I. a... e). Exploatarea unui zăcămint cu acest regim se termină, cînd presiunea, respectiv rația de gaze-țiței, au căzut la o valoare atît de mică, încît efectul de antrenare a gazelor asupra țițeiului dispăre. Coeficientul de extracție la regimul de gaze din soluție fiind foarte mic — el nu depășește 30% — în tehnica modernă de extracție, exploatarea unui zăcămint cu regim de gaze din soluție atît de des adoptată în trecut, nu se admite. Astfel de zăcămint se pot exploata rațional numai cu ajutorul operațiilor de menținere a presiunii. Dacă zăcămintul conține o apă marginală, se poate injecta apă dincolo de conturul de țiței-apă, creînd astfel, dacă celelalte condiții permit, un regim cu împingere de apă. A doua alternativă constă în injectarea de gaze în virful structurii, respectiv în zona de gaze libere secundară, care s-a format eventual în cursul exploatării, creîndu-se astfel un regim de expansiune a zonei de gaze libere. Exploatarea, numită în trecut « rațională », a

zăcămintelor cu regim de gaze din soluție, care constă în raționarea producției zăcămintului și în aplicarea unor măsuri de restricție a extracției din sondele cu rație mare, mărind totodată într-o anumită măsură debitele de țiței extrase din sondele cu rații mai mici, nu a fost decît un paliativ pentru situația rea în care au ajuns zăcămintele, după scăderea presiunii sub presiunea de început de fierbere. Această metodă nu mai poate fi considerată rațională, în sensul actual al cuvîntului.

4. Regimul elastic. În mod convențional, prin regim elastic se înțelege un regim determinat în special de expansiunea țițeiului din zăcămint (de energia de compresiune a țițeiului), atît timp cît presiunea lui este deasupra presiunii de început de fierbere a țițeiului. Zăcămintele cu regim elastic, în mod normal nu au o zonă inițială de gaze libere. În cadrul noțiunii de regim elastic intră și regimurile de zăcămint, la care acțiunea țițeiului subsaturat este susținută de expansiunea elastică a apei de zăcămint, care nu este destul de activă, pentru a crea în el un regim cu împingere de apă. Regimul elastic este deci caracterizat prin aceea că presiunea zăcămintului scade continuu, dar nu sub presiunea de început de fierbere a țițeiului, în timp ce rația de gaze rămîne constantă, și anume, egală cu

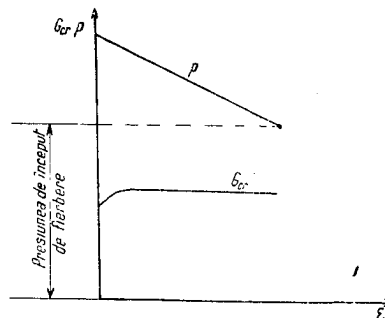


Fig. 18. Variația presiunii de zăcămint p și a rației de gaze G_{cr} , în funcție de coeficientul de extracție ε , la regimul elastic.

rația inițială de soluție (v. fig. 18). În consecință, o exploatare cu regim elastic poate fi considerată rațională, atît timp cît se respectă celelalte condiții ale unei exploatări raționale, în speță avansarea uniformă a conturului țiței-apă, acolo unde există apă de zăcămint, și evitarea formării unor zone pronunțat depresiionare în stratul de țiței.

Deoarece perioada regimului elastic — în cursul exploatării unui zăcămint — reprezintă o etapă relativ scurtă din viața lui productivă, la proiectarea exploatării zăcămintelor cu țiței subsaturat se ține seamă, în primul rînd, de regimul de zăcămint care se prevede după încetarea regimului elastic.

5. Regimul gravitațional. În mod convențional se numește regim gravitațional, numai

acel regim care este determinat în special de energia de poziție (gravitație) a țițeiului din zăcămint. De fapt, și la zăcămintele cu celelalte regimuri de exploatare, energia gravitațională a țițeiului, contribuie și ea la mișcarea fluidelor prin strat, dar într-o măsură relativ mică, dată fiind valoarea ei relativ mică.

În general, regimul gravitațional este deci, în timp, ultimul regim prin care poate trece exploatarea unui zăcămint. Debitele care se obțin, sînt aproape constante și proporționale cu grosimea și înclinarea stratului de țiței. În general, debitele obținute sînt mici, exploatarea este de lungă durată, obținîndu-se însă un coeficient de extracție final, mare. În cursul exploatarei cu regimul gravitațional, presiunea de zăcămint este mică; ea este egală cu presiunea hidrostatică a lichidului din strat și scade pe măsura golirii acestuia. Rația de gaze are valori cu totul neînsemnate.

O intensificare a ritmului de extracție la zăcămintele cu regim gravitațional se poate obține prin operații de spălare a stratului; cu apă sau cu gaze, adică prin operații de recuperare secundară.

Exploatarea zăcămintelor cu regim gravitațional nu face obiectul special al lucrărilor de proiectare, decît în rarele cazuri cînd un zăcămint nu dispune de la început de o altă energie, decît energia gravitațională a țițeiului.

c. Recuperarea secundară

În cadrul recuperării secundare sînt cuprinse metodele de exploatare care servesc la extragerea din zăcămint a țițeiului care a mai rămas, după ce energia zăcămintului s-a epuizat într-o măsură atît de mare, încît nu mai permite decît un ritm foarte lent de extracție.

Spălarea țițeiului din strat, cu apă, cu gaze sau cu aer injectat, care formează în prezent obiectul principal al metodelor de recuperare secundară, aplicate în industrie (v. Cap. VII), nu este rentabilă decît în cazul cînd saturația cu țiței a stratului, în momentul aplicării metodei, nu a scăzut sub o anumită valoare-limită, care oscilează în jurul cifrei de 40%.

Deci pentru aplicarea metodelor de recuperare secundară se ține seamă în primul rînd, de zăcămintele exploatare anterior sub regimul de gaze din soluție, care, neasigurînd decît un coeficient mic de extracție, lasă în urma lui cantități considerabile de țiței, în strat.

Dat fiind că în tehnica modernă a petrolului, proiectarea și conducerea exploatarei zăcămintelor urmăresc obținerea unui coeficient mare de extracție, în faza primară a extracției, respectiv menținerea energiei zăcămintului la un nivel cît mai înalt, este de prevăzut că — în viitor — importanța practică a metodelor de recuperare secundară va scădea considerabil. În prezent lipsește încă experiența pentru a putea preciza în ce măsură vor trebui folosite în viitor metodele de recuperare

secundară pentru zăcămintele care au fost exploatare rațional, în faza lor primară.

În linii mari se poate prevedea că la zăcămintele exploatare sub regimul cu împingere de apă, fie el natural, fie el artificial, creat prin operații de injectare, aplicarea metodelor de recuperare secundară nu va mai fi necesară. La zăcămintele exploatare sub regimul expansiunii zonei de gaze libere, corectivul aplicării metodelor de recuperare secundară se va mai impune în multe cazuri, pentru viitorul apropiat.

În orice caz, metodele de recuperare secundară, ca atare, sînt considerate ca metode de exploatare rațională, pentru că ele sînt folosite ca un corectiv al exploatarei neraționale, la care zăcămintul a fost supus anterior.

d. Studiul caracterului zăcămintelor de țiței

1. **Obiectul studiului.** Proiectarea corectă a exploatarei unui zăcămint, cum și conducerea ei în condiții raționale, cer o cunoaștere cît mai completă a caracteristicilor (respectiv a parametrilor) zăcămintului în cauză, care urmează a fi introduse în calcul sau luate în considerație, pentru alegerea metodei cele mai bune de exploatare. Deci, înainte de executarea proiectului propriu-zis, asupra zăcămintului trebuie să se facă un studiu care să cuprindă, cum se menționează în cele ce preced, caracterul geologic, caracterul fizic și caracterul productiv al zăcămintului.

2. Studiul caracterului geologic al zăcămintului.

a) **Studiul general al geologiei.** Acest studiu cuprinde:

— Tectonica generală a regiunii petrolifere, din care face parte structura cu zăcămintul vizat.

— Tectonica structurii, în care se află zăcămintul descriindu-se în special: Forma tectonică a structurii (anticlinal, dom, etc.). Limitarea structurii (prin masive de sare, falii, etc.). Dimensiunile structurii pe întindere și în adîncime. Accidente tectonice în interiorul structurii (falii, flexuri, etc.).

— Stratigrafia structurii, indicîndu-se: Formațiile geologice, caracterizarea lor scurtă ca facies și delimitarea formațiilor între ele. Poziția reciprocă în spațiu a formațiilor geologice între ele (succesiunea, concordanța, discordanța). Straturile de țiței, de gaze și de apă, descrise mai pe scurt sau mai detaliat, în măsura în care interesează zăcămintul dat.

b) **Studiul geologiei zăcămintului.** Acesta cuprinde:

— Tectonica zăcămintului, descriindu-se în special: Forma tectonică a zăcămintului și caracterul lui (deschis sau închis). Limitarea zăcămintului pe întindere și adîncime, în special etanșarea lui pe întindere, la acoperiș și la bază. Dimensiunile zăcămintului pe întindere și în adîncime. Accidente tecto-

nice în interiorul zăcămintului și caracterul lor privind comunicația fluidelor între zonele accidentate. Inclinarea stratului-colector.

— *Stratigrafia zăcămintului*, indicându-se în special: faciesul stratului-colector și variația lui în spațiu (omogen sau lenticular). Natura chimică a agentului de cimentare al rocii-colector (silicios, calcaros, etc.). Fluidele din zăcămint (țitei, apă, gaze), cum și contururile lor inițiale de separație.

c) *Material documentar*. Materialul documentar necesar studiului geologic cuprinde:

— tabloul sondelor forate, conținând toate datele geologice și tehnice din timpul forajului;
— carotajele electrice ale sondelor în care se vor înscrie și formațiile constatate din carotele mecanice;

— planșa de corelare a carotajelor electrice (armonică);

— harta structurală cu indicarea contururilor de separație a fluidelor din zăcămint;

— secții geologice;

— calculul grosimii stratului de țitei (v. ecuația (13) și fig. 5);

— harta de izopace (v. fig. 6).

3. *Studiul caracterului fizic al zăcămintului*.

a) *Condițiile inițiale de presiune și temperatură în zăcămint*. Variația presiunii zăcămintului în spațiu, la începutul exploatării.

— Presiunea inițială medie a zăcămintului.

— Presiunea inițială a zăcămintului, redusă la un nivel-reper.

— Variația temperaturii de zăcămint în spațiu.

— Gradientul geotermic în limitele zăcămintului.

b) *Proprietățile fizice ale fluidelor din zăcămint*. Proprietățile țiteiului în condiții standard, indicându-se în special: clasificarea țiteiului după Stas 1951-50; indicarea produselor de țitei dintr-o distilare primară normală, pentru a aprecia valoarea economică a țiteiului; greutatea specifică; viscozitatea; tensiunea superficială.

— Proprietățile gazelor în condiții standard, indicându-se în special: compoziția gazelor, în funcție de presiunea de separație; greutatea specifică (absolută sau relativă față de aer), în funcție de presiunea de separație; viscozitatea.

— Proprietățile țiteiului și ale gazelor, în condițiile de zăcămint, indicându-se în special: presiunea de început de fierbere (saturație) a țiteiului; rația inițială de soluție; rația de soluție la temperatura zăcămintului, în funcție de presiunea lui; greutatea specifică a țiteiului și a gazelor, la temperatura zăcămintului și în funcție de presiunea lui; coeficientul de volum al țiteiului, în funcție de presiune; coeficientul de compresibilitate al țiteiului sub-saturat; coeficientul de abatere al gazelor de la gazele perfecte; coeficientul de volum al

gazelor; viscozitatea țiteiului saturat și a gazelor, în funcție de presiune; tensiunea superficială *) a țiteiului saturat, în funcție de presiunea zăcămintului.

— Proprietățile apei de zăcămint, indicându-se în special: compoziția chimică a apei și clasificarea ei; greutatea specifică; viscozitatea în condițiile standard și de zăcămint; solubilitatea gazelor în apă; compresibilitatea; tensiunea superficială.

c) *Proprietățile fizice ale rocii-colectoare*. Porozitatea medie a rocii pe zăcămint sau pe zone tectonice:

— Permeabilitatea medie a rocii pe zăcămint sau pe zone.

— Saturația inițială medie a rocii, cu țitei, sau saturația remanentă medie cu apă, pe zăcămint sau pe zone.

d) *Materialul documentar și folosirea lui pentru studiul caracterului fizic al zăcămintului*.

1) *Materialul documentar* cuprinde:

— tabloul măsurărilor de presiune și temperatură de fund;

— diagrame de stabilizare a presiunii de fund a sondelor;

— tabloul analizelor de țitei;

— tabloul analizelor de gaze;

— diagramele rezultate din analizele probelor de fund în autoclava de expansiune, reprezentând, la temperatura zăcămintului și în funcție de presiune: rația de soluție, greutatea specifică a țiteiului și a gazelor, coeficientul de volum al țiteiului, coeficientul de abatere al gazelor de la gazele perfecte, viscozitatea țiteiului și compoziția gazelor, în funcție de presiunea de separație;

— tabloul analizelor apelor de zăcămint;

— tabloul analizelor carotelor extrase;

— calculul porozității medii a stratului petrolifer;

— harta cu izoperme;

— harta liniilor de porozitate egală.

2) *În vederea folosirii materialului documentar și în general a stabilirii proprietăților fizice ale zăcămintului pot servi următoarele indicații:*

— Pentru stabilirea presiunii inițiale a zăcămintului afară de tabloul măsurărilor de presiune, se pot folosi și informațiile asupra condițiilor în care au pornit sondele în producție, în speță dacă au pornit cu gaura plină cu lichid (noroi, apă, țitei), sau după ce gaura a fost golită pînă la o anumită adîncime. Presiunea hidrostatică a coloanei de lichid, cu lungimea și greutatea specifică anumite, indică aproximativ presiunea zăcămintului.

— Pentru calculul presiunii reduse se ia de preferință drept nivel-reper, izobata contactului țitei-gaze sau țitei-apă, iar densitatea țiteiului se ia din diagrama care prezintă greutatea spe-

*) Mai exact, interfacială, gaze-țitei.

cifică a țițeiului, la temperatura zăcămintului și în funcție de presiunea lui.

— Presiunea de început de fierbere a țițeiului se stabilește ușor, cu ajutorul analizei în autoclava de expansiune a unei probe de fund, care a fost luată dintr-o sondă a cărei presiune de fund a fost sigur deasupra presiunii de început de fierbere. În acest caz, în diagrama care prezintă rația de soluție, în funcție de presiune, presiunea de început de fierbere este marcată prin punctul de întoarcere al curbei, de la care, la creșterea presiunii, rația de soluție rămâne constantă (v. punctul F,

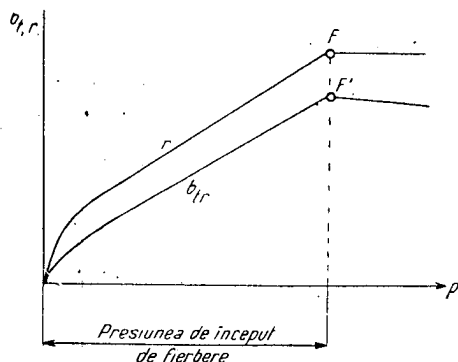


Fig. 19. Rația de soluție r și coeficientul de volum al țițeiului b_v în funcție de presiunea p .

fig. 19). Presiunea de început de fierbere poate fi stabilită și din curba care prezintă coeficientul de volum al țițeiului, în funcție de presiune (punctul F', fig. 19). Cu ajutorul ramurii descendente a acestei curbe, se poate stabili și coeficientul de compresibilitate al țițeiului (cu gazele dizolvate în el), în condițiile de zăcămint.

— Coeficientul de volum al gazelor se stabilește cu ajutorul ecuației (9).

— Porozitatea medie a rocii colectoare se stabilește din rezultatele analizelor carotelor extrase și ale ecuațiilor (15) și (16).

— Pentru permeabilitatea medie a rocii colectoare se pot forma două ecuații similare ecuațiilor (15) și (16):

$$k_i = \frac{\sum_{j=1}^a \Delta_j h_i k_j}{\sum_{j=1}^a \Delta_j h_i} \quad (28)$$

$$k_m = \frac{\sum_{i=1}^n F_i h_i k_i}{\sum_{i=1}^n F_i h_i} \quad (29)$$

în care:

- k_i — este permeabilitatea medie a straturului, la sonda i ;
- a — numărul carotelor, analizate la sonda i ;
- $\Delta_j h_i$ — intervalul de adâncime din care s-a scos carota j (la sonda i);
- k_j — permeabilitatea carotei j ;
- k_m — permeabilitatea medie a întregului strat;
- F_i — suprafața straturului, atribuită sondei i ;
- h_i — grosimea straturului pe suprafața F_i ;
- n — numărul sondelor, de la care s-au scos carote.

Cifre de control pentru permeabilitatea straturului se pot obține și cu ajutorul ecuației:

$$k = \frac{b \mu_t \log \frac{r_e}{r_s}}{23,5 \gamma_t h (p_e - p_s)} \cdot \frac{q}{\varphi_{si}} \quad (30)$$

în care:

- k — este permeabilitatea zonei de drenaj a unei sonde, în Darcy;
- q — debitul zilnic al sondei, în t;
- b — coeficientul de volum al țițeiului;
- μ_t — viscozitatea țițeiului;
- r_e/r_s — raportul razelor de drenaj, respectiv ale sondei (în oricare unitate de măsură);
- γ_t — greutatea specifică a țițeiului, în t/m³;
- h — grosimea straturului, în m;
- p_e, p_s — presiunea de fund statică, respectiv dinamică, a sondei, în at;
- φ_{si} — coeficientul de imperfecție al sondei (v. cap. II).

Este însă de observat că ecuația (30) este valabilă numai cînd presiunile p_e și p_s sînt mai mari decît presiunea de început de fierbere a țițeiului.

Indicații asupra permeabilității straturului mai oferă și diagramele de stabilizare a presiunii de fund a sondelor care prezintă presiunea de fund a unei sonde, în funcție de timpul care a trecut din momentul închiderii ei. Cu cît presiunea de fund crește mai repede, cu atît permeabilitatea este mai mare.

— Saturația cu apă remanentă a straturului se stabilește cu ajutorul analizelor de carote, folosind ecuații analoge ecuațiilor (28) și (29).

4. Studiul caracterului productiv al zăcămintului. Acest studiu tratează următoarele obiecte:

a) Variația presiunii de zăcămint, în timp, respectiv în funcție de cantitatea de țiței extrasă și, în sfîrșit, în funcție de coeficientul de extracție.

b) Variația rației de gaze, în funcție de același parametru ca și în cazul presiunii de zăcămint.

c) Variația în timp a debitului zăcămintului; stabilirea declinului de producție; variația capacității de producție a zăcămintului, caracterizată prin variația cantității de țiței, extrase pentru fiecare atmosferă de scădere a presiunii de zăcămint.

d) Variația în timp a poziției conturului țiței-gaze, respectiv țiței-apă.

e) Stabilirea regimului predominant de zăcămint, pe baza constatărilor făcute la punctele a, b, c și d de mai sus, conform celor expuse în subcapitolul B.

f) Variația, în funcție de presiune, respectiv de cantitatea de țiței extrasă, a următorilor parametri:

- coeficientul de volum al țițeiului;
- coeficientul de volum al gazelor;
- saturația cu țiței a stratului care se poate calcula prin ecuația:

$$\frac{x}{N} = \left(\frac{S_{t_0}}{b_0} - \frac{S_t}{b_t} \right) : \frac{S_{t_0}}{b_0} \quad (31)$$

în care:

x , N sînt cantitatea de țiței extrasă, respectiv rezerva inițială de țiței;

S_{t_0} , S_t — saturația cu țiței inițială, respectiv la un moment dat;

b_0 , b_t — coeficientul de volum al țițeiului, inițial, respectiv la un moment dat.

Această formulă este valabilă pentru zăcămint în regim de gaze din soluție.

La zăcămintele cu zona de gaze sau apă activă este valabilă ecuația:

$$S_t = 100 \left(1 - \frac{x - \varepsilon_g N_g - \varepsilon_a N_a}{N_t} \right) \times \frac{b}{b_0} \left(1 - \frac{S_a}{100} \right) \quad (31 a)$$

în care:

N_t este țițeiul existent inițial în zona actualmente în producție;

N_g — țițeiul existent inițial în zona inundată de gaze;

N_a — țițeiul existent inițial în zona inundată de apă;

ε_a , ε_g — coeficienți de extracție pentru apă și gaze.

g) Rezerva de țiței și gaze a zăcămintului, care se stabilește, respectiv se verifică, prin metodele expuse în subcapitolul a.

h) Etanșeitatea faliilor în interiorul zăcămintului. Indicații asupra etanșeității, respectiv a neetanșeității acestor falii se obțin din:

- studiul secțiunilor geologice și al carotajelor electrice, care indică poziția reciprocă a părților stratului dintr-o parte și din cealaltă a faliei, dînd totodată și o serie de indicații de ordin tectonic și stratigrafic;

— studiul comparativ al presiunilor statice de fund ale sondelor din ambele părți ale faliei;

— studiul comparativ, privind caracterul productiv al sondelor din ambele părți ale faliei (debite, rații de gaze, calitatea țițeiului, etc.);

— studiul interferenței între sondele din ambele părți ale faliei (variația presiunii, a debitului, a rației, etc. în cazul opririi unora dintre sonde);

— studiul comparativ al poziției conturilor de țiței-gaze, respectiv țiței-apă, din ambele părți ale faliei.

i) Materialul documentar din cadrul studiului caracterului productiv al zăcămintului cuprinde:

- tablouri conținînd, pentru sondele exploatare, producția lunară (țiței, apă, și gaze), presiunile în coloană și în țevile de extracție, duzele și indicații asupra unor eventuale anomalii în mersul producției. Sondele vor fi grupate pe blocuri tectonice separate;

— tabloul măsurărilor de presiune de fund;

— diagrame indicînd variația presiunii, a rației și a debitului pe zăcămint, respectiv pe blocuri tectonice separate;

— hărți cu izobare;

— hărți cu linii de rație egală;

— hărți structurale, indicînd variația poziției conturului de țiței-gaze, respectiv țiței-apă, cum și împărțirea zăcămintului pe blocuri tectonice separate;

— calculul rezervelor;

— diagrame reprezentînd variația parametrilor.

Observație. În practică, de multe ori nu este posibil să se descrie caracterul unui zăcămint în toate detaliile, indicate la punctele precedente. În cazul proiectării exploatarei primare, uneori exploatarea a fost de o durată prea scurtă, pentru a se putea obține toate datele necesare, iar în cazul proiectării unei operații de recuperare secundară, lipsește uneori documentarea primară, privind trecutul zăcămintului. În astfel de cazuri este necesară folosirea unor cifre medii mai largi, sau a unor cifre luate de la alte zăcămintele similare, urmînd ca exactitatea lor să fie verificată în cursul executării proiectului, care eventual va trebui modificat ulterior, dacă cifrele introduse la început în calcul, se dovedesc prea departe de realitate.

e. Bazele hidrodinamice ale exploatarei zăcămintelor de țiței

1. Scopul și condițiile de aplicare ale hidrodinamice subterane. La proiectarea exploatarei zăcămintelor de țiței, cu ajutorul hidrodinamice subterane se rezolvă următoarele probleme:

- stabilirea schemelor raționale de amplasare a sondelor;
- stabilirea debitului zăcămintelor;
- stabilirea duratei de exploatare.

La rezolvarea acestor probleme se presupune existența următoarelor condiții:

— Pentru proprietățile zăcămintelor, ca: grosimea, porozitatea, permeabilitatea roci colectoare sau greutatea specifică și alte proprietăți ale fluidelor, se consideră reprezentative valorile medii ale acestor parametri, așa cum au fost calculați din datele existente.

În acest capitol se vor analiza cazurile când regimul zăcămintelor este cel cu împingere de apă, de expansiune a zonei de gaze libere sau regimul gravitațional, caracterizate prin contururi mobile care avansează în urma țiteiului, în cursul migrării acestuia spre sondele în producție *).

— Curgerea fluidelor prin zăcămintă se consideră o curgere plană, ceea ce după Scelcacev

apă nu este întinsă, cele două contururi se pot înlocui printr-un singur contur mediu, $M_1 - M_2$, care se consideră conturul teoretic al zonei de țitei. În aceleași condiții, proiecția unei linii medii a suprafeței de afloriment reprezintă conturul de alimentare, $C_1 - C_2$, adică limita exterioară a sistemului hidrodinamic al zăcămintului.

În cursul exploatării zăcămintului se produce o deplasare a conturului teoretic țitei-apă, care se îndepărtează mereu de conturul de alimentare. Admițând simplificările precedente, curgerea fluidelor prin strat se poate considera ca o curgere liniară, care este caracterizată prin deplasarea suprafeței de separație (de contact) țitei-apă, într-un tub cu secțiunea variabilă F a cărei valoare este dată prin ecuația

$$F = c \cdot h \quad (32)$$

în care:

c este circumferința conturului teoretic țitei-apă;

h — grosimea stratului.

Tubul cu secțiunea variabilă se consideră deci drept schema hidrodinamică a zăcămintului, iar practica și calculul dovedesc că eroarea care se face prin adoptarea acestei scheme nu depășește 4%, în toate cazurile în care suprafața de contact țitei-apă nu este prea mare.

2. Ecuațiile hidrodinamice de bază ale curgerii fluidelor în strat. Exploatarea rațională

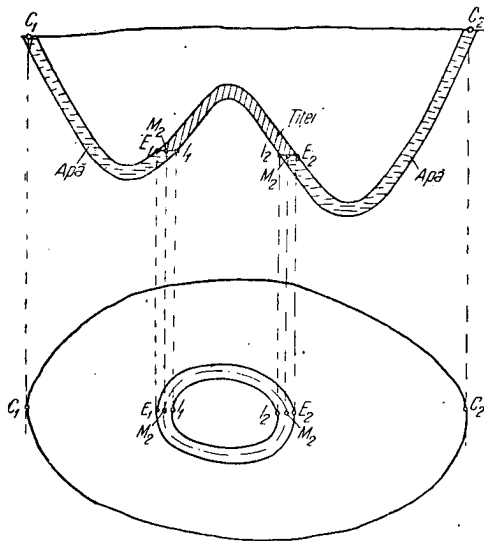


Fig. 20. Schema unui zăcămint de țitei.

se poate admite, ținând seamă de faptul că, de obicei, dimensiunile în plan ale unui zăcămint sînt relativ foarte mari față de grosimea lui.

Pentru a putea rezolva problemele menționate pe cale analitică, se reprezintă zăcămintele sub o formă simplificată. Schema unui zăcămint deschis este reprezentată în fig. 20. Stratul acestui zăcămint cuprinde două flancuri de cută saturate cu apă, care aflorază la suprafață, iar centrul este saturat cu țitei. În plan apar două contururi de separație între țitei și apă: unul exterior, $E_1 - E_2$, care este format de întretărirea suprafeței de separație cu acoperișul stratului și unul interior, $I_1 - I_2$, format de suprafața de separație și baza stratului.

Dacă suprafața de separație între țitei și

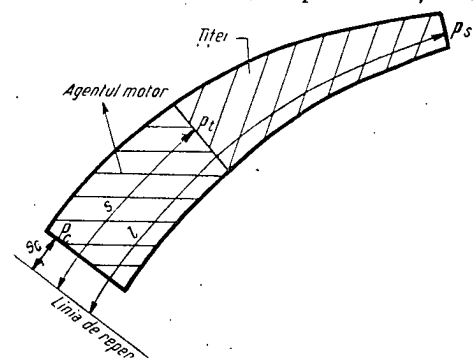


Fig. 21. Schema hidrodinamică a unui zăcămint de țitei.

a zăcămintelor cu regimurile caracterizate prin contururi mobile cere, printre altele, amplasarea sondelor în formă de rînduri, spre care conturul țitei-apă să avanseze uniform, astfel încît să atingă simultan toate sondele aceluiași rînd. Prin urmare, rîndurile de sonde vor fi linii care geometric sînt asemănătoare conturului inițial țitei-apă.

În vederea simplificării calculului hidrodinamic, rîndurile de sonde se înlocuiesc cu galerii care, în realitate, nu sînt altceva decît rînduri de sonde între care distanța este egală cu 0.

Adoptînd drept schemă hidrodinamică a zăcămintului un tub cu secțiunea variabilă, curgerea fluidelor este reprezentată în fig. 21. Poziția conturului de alimentare este dată

*) În ce privește exploatarea zăcămintelor de țitei în regim elastic, vezi M. Muscat, «Bazele fizice ale tehnologiei extracției de țitei». Cap. VIII, Gostoptehizdat, 1953.

prin distanța s_c de la o linie de reper, și poziția galeriei, prin distanța l . Parte din tub este umplută cu țiței, și restul, cu agentul motor care poate fi sau apă sau gaze. Poziția conturului țiței-agent este dată prin distanța s , care este variabilă în timp, pe măsură ce conturul se deplasează.

Debitul de curgere printr-o secțiune oarecare este dat prin ecuația:

$$Q = - \frac{k}{\mu} \frac{dp}{ds} F = - \frac{dp}{\mu} \frac{ds}{kF} \quad (33)$$

în care:

- Q este debitul de curgere;
- F — secțiunea zăcămintului în punctul unde se măsoară debitul conform ecuației (32);
- s — abscisa (curbălinie) a secțiunii F ;
- dp/ds — gradientul de presiune în punctul măsurării;
- μ — viscozitatea fluidului care curge prin F ;
- k — permeabilitatea stratului în punctul măsurării.

Pentru a exprima debitul zăcămintului, în funcție de presiunile p_1 și p_2 , care există în două puncte ale zăcămintului cu distanța $s_2 - s_1$ între ele, servește ecuația:

$$Q = \frac{p_1 - p_2}{\int_{s_1}^{s_2} \frac{\mu}{kF} ds} \quad (34)$$

unde, în cazul cel mai general, valorile μ , k și F sînt variabile.

Adaptînd această ecuație la cazul prezentat în fig. 21, pentru debitul zăcămintului se pot formula următoarele ecuații:

$$Q = \frac{p_c - p_t}{\mu_a \int_{s_c}^s \frac{ds}{kF}} = \frac{p_t - p_s}{\mu_t \int_s^l \frac{ds}{kF}} = \frac{p_c}{\mu_a \int_{s_c}^s \frac{ds}{kF} + \mu_t \int_s^l \frac{ds}{kF}} \quad (35)$$

în care:

- p_c , p_t și p_s sînt presiunile la conturul de alimentare, respectiv la conturul de țiței, respectiv la galerie;
- μ_a , μ_t — viscozitatea agentului activ, considerată constantă, respectiv a țițeiului.

Este de observat că prin presiuni nu se înțeleg presiunile piezometrice, ci presiunile «reduse» sumele $p' + \gamma z$, în care p' este presiunea în punctul respectiv; γ — greutatea specifică a fluidului, și z — înălțimea punctului deasupra unui plan fix de referință.

Curgerea descrisă anterior este o curgere de două fluide (bifazică). Valoarea numitorilor ecuațiilor (35) este variabilă; ea depinde în primul rînd de mărimea s , adică de poziția contactului țiței-agent motor care se deplasează continuu. Din această cauză debitul Q , respectiv viteza de curgere variază continuu și, prin urmare, curgerea este nestaționară.

Durata de deplasare a contactului țiței-agent motor între două puncte cu coordonatele s_1 și s_2 se poate calcula cu ajutorul ecuației (35), în care valoarea lui Q se înlocuiește cu:

$$Q = F \cdot m \cdot \frac{ds}{dt} \quad (36)$$

Dacă se mai introduce expresia:

$$F \left[\mu_a \int_{s_c}^s \frac{ds}{kF} + \mu_t \int_s^l \frac{ds}{kF} \right] \equiv R(s) \quad (37)$$

se obține ecuația:

$$t = \int_{s_1}^{s_2} \frac{m}{\Delta p} R(s) \cdot ds \quad (38)$$

în care:

- t este durata de deplasare a contactului de țiței-agent între punctele cu coordonatele s_1 și s_2 ;
- m — porozitatea stratului;

$$\Delta p = p_c - p_s.$$

Pentru a putea rezolva integrala din ecuația (38), este necesar să se cunoască m , Δp , k și F , ca funcții ale poziției, determinată prin s . În multe cazuri, rezolvarea se simplifică prin

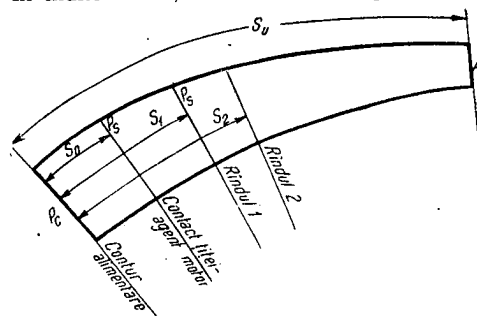


Fig. 22. Amplasarea optimă a galeriilor pe un zăcămint.

aceea că unii dintre parametri sînt constanți, respectiv că se introduc valorile lor medii pe zăcămint.

3. Principiile stabilirii amplasării raționale a galeriilor. Durata de exploatare a unui zăcămint pe care sînt amplasate n rînduri de sonde de exploatare, se compune din n etape. Durata fiecărei etape se consideră timpul în care agentul activ, respectiv contactul său cu țițeiul, avansează de la un rînd pînă la cel următor, inundîndu-l.

Fig. 22 reprezintă schema hidrodinamică a unui zăcămint cu n rînduri de sonde, amplasate

la distanțele s_1, s_2, \dots, s_n , de la conturul de alimentare; distanța contactului cu țițeiul, de la conturul de alimentare, este s_0 . La toate rindurile, presiunile p_s sînt egale între ele, și presiunea la conturul de alimentare este p .

După ecuația (38), durata totală de exploatare a zăcămintului din fig. 22 este dată prin ecuația:

$$t_{0n} = \sum_{i=1}^{i=n} \int_{s_{i-1}}^{s_i} \frac{m}{\Delta p} R(s) ds = \sum_{i=1}^{i=n} \int_{s_{i-1}}^{s_i} \frac{m}{\Delta p} F \left[\mu_a \int_{s_c}^s \frac{ds}{kF} + \mu_e \int_s^{s_i} \frac{ds}{kF} \right] ds \quad (39)$$

în care:

t_{0n} este durata totală de exploatare a zăcămintului;

i — numărul de ordine al galeriilor care înlocuiesc rindurile;

s_c — abscisa conturului de alimentare luat ca origine.

În vederea unei exploatare raționale, rîndurile de sonde trebuie amplasate astfel, încît durata totală de exploatare să devină un minimum. Expresia analitică a acestei condiții se

obține, formînd derivata parțială $\frac{\partial t_{0,n}}{\partial s_i}$ și egă-

lînd-o cu zero. De aici rezultă ecuația:

$$\left(\frac{1}{kF} \right)_i \cdot \int_{s_{i-1}}^{s_i} \frac{mF}{\Delta p} ds - \left(\frac{mF}{\Delta p} \right)_i \cdot \int_{s_i}^{s_{i+1}} \frac{ds}{kF} = 0. \quad (40)$$

Ecuația (40) dă o relație între coordonatele celor trei rînduri consecutive, cu numărul de ordine $i-1, i, i+1$, respectiv o relație între distanțele dintre rînduri, care are forma generală:

$$\Phi(s_{i-1}, s_i, s_{i+1}) = 0. \quad (41)$$

Cum se vede din ecuația (40), distanțele dintre rînduri nu depind de viscozitatea fluidelor și nici de distanța conturului de alimentare. Relația între coordonatele s_{i-1}, s_i și s_{i+1} se poate determina dacă se cunosc parametrii m, k, F și Δp ca funcții ale poziției, respectiv ale abscisei s .

4. Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele liniare. a) *Zăcămintele liniare cu regimul cu împingere de apă.* Prin zăcămintele liniare se înțeleg zăcămintele în formă de bandă, la care întinderea într-o direcție este mare față de întinderea în direcția perpendiculară pe prima, și care au conturul de alimentare în forma unei linii drepte, paralele cu prima direcție. Dacă zăcămintul are un regim cu împingere de apă, presiunea la conturul de alimentare se poate considera constantă. Un astfel de zăcămint este reprezentat în fig. 23. Dacă se presupune că zăcămintul are lățimea constantă și aceeași presiune de fund la toate sondele, și dacă pentru grosimea, porozitatea și permea-

bilitatea stratului se iau valorile medii pe strat, în ecuația (40), valorile $\Delta p, F, m$ și k sînt constante, obținîndu-se relația simplă:

$$s_{i+1} - s_i = s_i - s_{i-1} \quad (42)$$

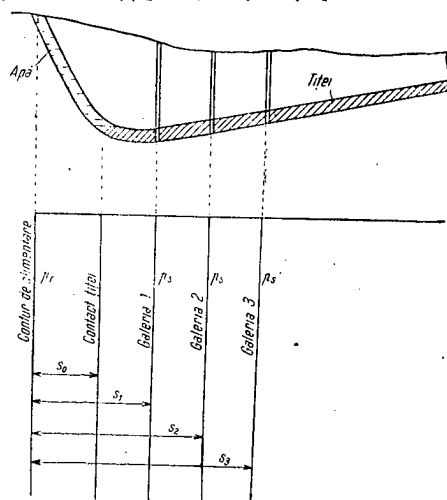


Fig. 23. Amplasarea optimă a galeriilor într-un zăcămint liniar, în regim cu împingere de apă.

Deci, în astfel de zăcămintele, rîndurile de sonde se așază la distanțe egale între ele. În practică, numărul rîndurilor de sonde este

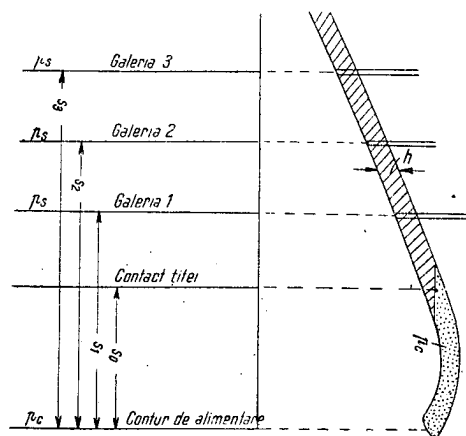


Fig. 24. Amplasarea optimă a galeriilor într-un zăcămint liniar, cu regim de expansiune a zonei de gaze libere.

de obicei cunoscut. Ultimul rînd de sonde se așază cît mai aproape de limita superioară a zonei de țiței, iar distanța dintre rînduri se află împărțind distanța dintre ultimul rînd și contactul de țiței, prin numărul rîndurilor.

b) *Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele liniare cu regim de expansiune a zonei de gaze libere.* Schema zăcămintului este reprezentată în fig. 24. Dacă zăcămintul are

lățimea constantă și aceeași presiune de fund la toate sondele și dacă pentru grosimea, porozitatea și permeabilitatea stratului se adoptă valorile medii, ecuația (40) ia forma simplificată:

$$\int_{s_{i-1}}^{s_i} \frac{ds}{\Delta p} = \frac{1}{\Delta p_i} \int_{s_i}^{s_{i+1}} ds = \frac{s_{i+1} - s_i}{\Delta p_i} \quad (43)$$

În ce privește valoarea pentru $\Delta p = p_c - p_s$, se poate admite că presiunea, în toată zona de gaze libere și prin urmare și la contactul cu țițeiul, este constantă și egală cu p_c , deoarece viscozitatea gazelor și greutatea lor specifică sînt mici, în raport cu ale țițeiului, putîndu-se neglija. Valoarea absolută a presiunii p_c nu este constantă ca la regimul cu împingere de apă, ci se micșorează pe măsură ce contactul cu țițeiul avansează. Ea se exprimă prin ecuația:

$$p_c = \frac{p_{c0} \cdot v_0}{v_0 + mbhs} \quad (44)$$

în care:

p_{c0} , v_0 sînt presiunea, respectiv volumul de pori inițial al zonei de gaze libere;

b , h — lățimea, respectiv grosimea stratului;

s — abscisa curbilinie a contactului.

Ecuația (44) este valabilă, dacă nu se extrag gaze din zona de gaze libere și nici nu intră gaze în ea (prin injectare, etc.).

Introducînd în ecuația (43), pentru Δp expresia:

$$\Delta p = \frac{p_{c0} \cdot v_0}{v_0 + m b h s} - p_s$$

după integrare și anumite transformări se obține:

$$\begin{aligned} \pi_s \ln \frac{\pi_s - 1 - \lambda_{i-1}}{\pi_s - 1 - \lambda_i} - (\lambda_i - \lambda_{i-1}) &= \\ &= (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \frac{1 + \lambda_i}{\pi_s - 1 - \lambda_i} \end{aligned} \quad (45)$$

în care:

$$\pi_s = \frac{p_{c0}}{p_s}; \quad \lambda_{i-1} = \frac{s_{i-1}}{l_0}; \quad \lambda_i = \frac{s_i}{l_0};$$

$$\lambda_{i+1} = \frac{s_{i+1}}{l_0}, \text{ și } l_0 = \frac{v_0}{mbh}.$$

Valorile λ_{i-1} , λ_i și λ_{i+1} se găsesc prin încercări.

Dacă volumul zonei de gaze libere este foarte mare, astfel încît practic presiunea lui nu scade decît foarte puțin în cursul exploatării, sau dacă presiunea de zăcămint este

menținută prin injectarea de gaze, ecuația (45) se simplifică astfel:

$$\lambda_i - \lambda_{i-1} = \lambda_{i+1} - \lambda_i \quad (46)$$

respectiv

$$s_i - s_{i-1} = s_{i+1} - s_i.$$

Ecuația devine deci identică cu ecuația (42), care s-a găsit pentru zăcămintele liniare în regim cu împingere de apă.

c) Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele liniare, în regim cu împingere de apă și de expansiune a zonei de gaze libere. Schema

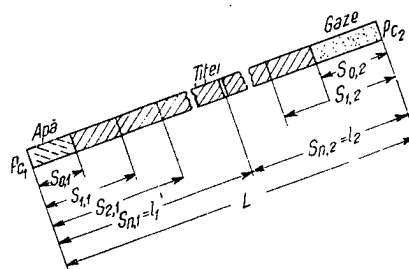


Fig. 25. Amplasarea optimă a galeriilor într-un zăcămint liniar în regim cu împingere de apă și de expansiune a zonei de gaze libere.

zăcămintului este reprezentată în fig. 25. În cazul zăcămintelor cu regim mixt, galeriile trebuie amplasate astfel, încît ambele contururi țiței-agent motor să atingă simultan ultima galerie.

În vederea rezolvării problemei se presupun cunoscute:

- p_{c1} , p_{c2} — presiunile la contururile de alimentare;
- p_{s1} , p_{s2} — presiunile de fund ale sondelor în fiecare parte;
- n_1 , n_2 — numărul galeriilor în fiecare parte;
- $s_{0,1}$, $s_{0,2}$ — coordonatele inițiale ale contactelor țiței-agent motor;
- $L = l_1 + l_2$ — lungimea totală a zăcămintului,

în care l_1 și l_2 reprezintă distanța ultimei galerii de la contururile de alimentare.

Pentru a găsi pozițiile tuturor galeriilor, se folosește următoarea metodă grafică:

Se aleg câteva valori pentru lungimea l_1 și se stabilește poziția galeriilor pentru fiecare valoare aleasă pentru l_1 după metoda expusă anterior pentru zăcămintele în regim cu împingere de apă. Apoi pentru fiecare variantă se calculează timpul de exploatare, cu ajutorul ecuației (38).

După aceea se trasează curba $t_{0-n,1} = f(l_1)$ cum indică fig. 26.

În mod similar se construiește curba $t_{0-n,2} = f(l_2)$ ținîndu-se seamă de cele indicate

anterior la zăcămintele cu regim de expansiune a zonei de gaze libere.

Punctul de întretăiere între aceste două curbe determină lungimea l_1 , respectiv l_2 , după care se pot stabili pozițiile finale ale

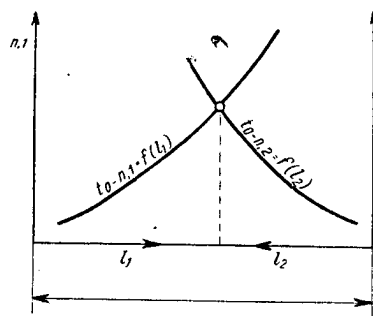


Fig. 26. Durata de exploatare în funcție de lungimile zonelor cu regim diferit.

galeriilor, conform celor menționate la 1 și 2.

d) *Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele liniare cu regim gravitațional.* Schema zăcămintului este reprezentată în fig. 27. Conturul de țiței este format de o « suprafață liberă », care se găsește sub presiunea atmosferică. Presiunea în galerii este tot cea atmosferică.

Aplicind cazului ecuația (34), pentru debitul de curgere în strat, se obține:

$$Q = \frac{1 + (h_0 - h_1) \gamma - 1}{\mu_t \int_{s_0}^{s_1} \frac{ds}{kF}} \quad (47)$$

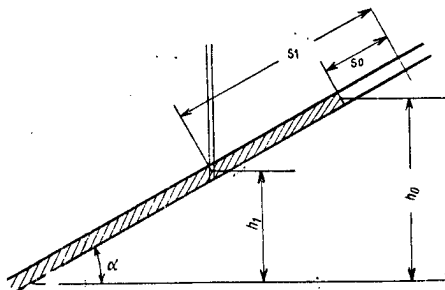


Fig. 27. Amplasarea galeriilor în zăcămintele cu regim gravitațional.

în care γ este greutatea specifică a țițeiului. Admițându-se valorile pentru k și F constante, și folosindu-se relația:

$$h_0 - h_1 = (s_1 - s_0) \sin \alpha$$

se obține pentru ecuația (34) forma finală:

$$Q = \frac{kF}{\mu_t} \gamma \sin \alpha \quad (48)$$

Deci, debitul galeriei este constant și independent de poziția acesteia pe zăcămint sau de

distanța ei de alte galerii. Așa dar, nu există decât o singură valoare pentru durata de exploatare a zăcămintului. Acesta poate fi exploatat printr-un singur rând de sonde, amplasat pe marginea de jos a zăcămintului.

5. *Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele circulare.* a) *Zăcămintele circulare în regim cu împingere de apă.* Schema unui astfel de zăcămint este reprezentată în fig. 28. Ca și

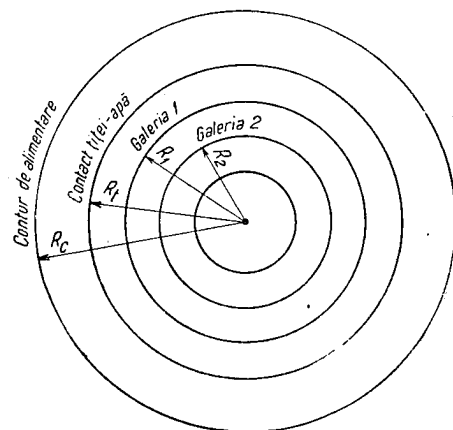


Fig. 28. Amplasarea optimă a galeriilor într-un zăcămint circular în regim cu împingere de apă.

la zăcămintele liniare și aici se pot introduce în calcul valorile medii pentru m , k și h . În cazul regimului cu împingere de apă se mai poate considera constantă și valoarea presiunii la conturul de alimentare p_c . În schimb secțiunea F este variabilă, în funcție de poziția ei, după ecuația:

$$F = 2\pi R \cdot h \cdot m \quad (49)$$

Dacă se presupune că galeriile au aceeași presiune de fund, p_s , $\Delta p = \text{const}$ și în aceste condiții, simplificind ecuația (9), se obține:

$$\frac{1}{R_i} \int_{R_{i-1}}^{R_i} R dR - R_i \int_{R_i}^{R_{i+1}} \frac{dR}{R} = 0. \quad (50)$$

După integrare și anumite transformări, se obține:

$$\frac{p_{i+1}}{p_{i-1}} = \frac{p_i}{p_{i-1}} \exp \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{(\rho_i/\rho_{i-1})^2} \right] \right\} \quad (51)^*$$

în care:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{i-1} &= \frac{R_{i-1}}{R_0} ; \\ \rho_i &= \frac{R_i}{R_0} ; \\ \rho_{i+1} &= \frac{R_{i+1}}{R_0} . \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

*) Cu cunoscuta notație $e^y \equiv \exp(y)$.

Cunoscându-se valorile pentru R_0 , n (numărul galeriilor) și R_n (poziția ultimei galerii), se pot găsi valorile pentru R_1, R_2, \dots , adică pozițiile celorlalte galerii, prin încercări cu ajutorul ecuației (51), în care se introduce:

$$\rho_0 = \frac{R_t}{R_0} = 1 \text{ și } \rho_n = \frac{R_n}{R_0}$$

Rezolvarea problemei se simplifică, în mod considerabil, prin folosirea diagramelor din fig. 29, construite de B.E. Kazarnovskaia, conform exemplului următor:

Fie cunoscute:

$$R_t = 2000 \text{ m}; n=6; R_n=300 \text{ m}$$

De aici:

$$\rho_6 = \frac{R_6}{R_0} = \frac{300}{2000} = 0,15.$$

Se duce o dreaptă, paralelă cu axa absciselor, la distanța 0,15 de la aceasta. Paralela taie curba $n=6$ în punctul B_6 ; prin punctul B_6 se duce o paralelă la axa ordonatelor, care taie curbele $n=5, 4, 3, 2, 1$, în punctele B_5, B_4, B_3, B_2 și B_1 . Ordonatele acestor puncte sînt valorile pentru ρ_5 respectiv ρ_4 , respectiv ρ_3 , respectiv ρ_2 , respectiv ρ_1 . Astfel se găsește:

$$\rho_5 = 0,27; \rho_4 = 0,435; \rho_3 = 0,58; \\ \rho_2 = 0,73; \rho_1 = 0,87;$$

de aci:

$$R_5 = \rho_5 R_0; R_4 = \rho_4 R_0; R_3 = \rho_3 R_0; \\ R_2 = \rho_2 R_0 \text{ și } R_1 = \rho_1 R_0$$

$$R_5 = 540; R_4 = 870; R_3 = 1160;$$

$$R_2 = 1460 \text{ și } R_1 = 1740 \text{ m.}$$

Dacă se proiectează și o sondă în centrul zăcămintului, aceasta se consideră ultima galerie, și raza ei se consideră raza sondei r_s . În

acest caz, valoarea $\rho_n = \frac{r_s}{R_0}$ devine foarte mică, și folosirea diagramelor normale dă rezultate inexacte. Din acest motiv, fig. 29 se completează cu o serie de diagrame ($n = 1, 2, \dots$), care reprezintă părțile de jos ale diagramelor normale, la o scară mult mărită.

b) Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele circulare cu regim de expansiune a zonei de gaze libere. Schema unui astfel de zăcămint este reprezentată în fig. 30. Ca și la zăcămintele liniare cu regim de expansiune a zonei de gaze libere, la zăcămintele circulare, presiunea în toată zona de gaze libere se poate considera egală cu presiunea de pe conturul de alimentare p_c . Această presiune nu este constantă ca la regimul cu împingere de apă. Dacă nu se extrag gaze din zona de gaze libere și nici

nu intră gaze în ea (prin injectare etc.), se poate forma ecuația:

$$p_c = \frac{p_{c_0} \cdot v_0}{v_0 + \pi (R^2 - R_0^2) mh} \quad (53)$$

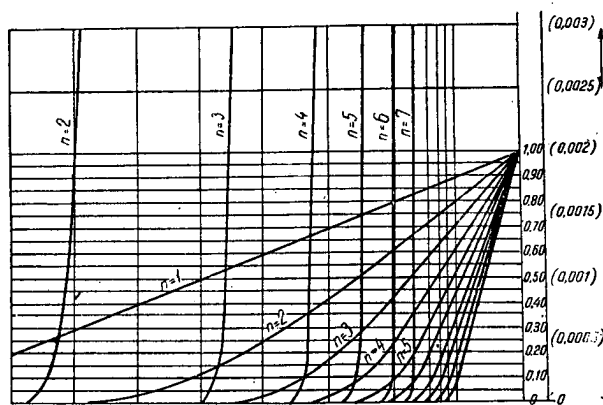


Fig. 29. Diagrame pentru amplasarea optimă a galeriilor într-un zăcămint circular în regim cu împingere de apă (după B.E. Kazarnovskaia).

în care:

p_c, p_{c_0} sînt presiunea zonei de gaze libere la un moment dat, respectiv inițial;
 v_0 — spațiul poros inițial al zonei de gaze;
 R_0 — raza inițială a zonei de gaze;
 h, m — grosimea, respectiv porozitatea straturii.

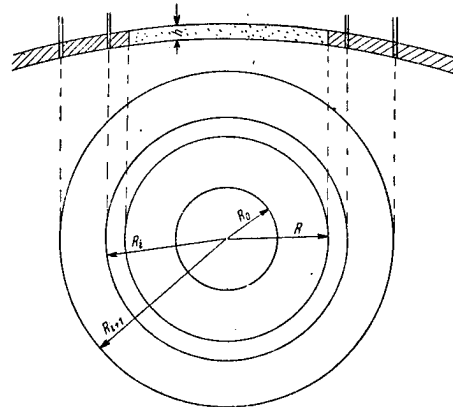


Fig. 30. Amplasarea optimă a galeriilor într-un zăcămint circular cu regim de expansiune a zonei de gaze libere.

Introducînd în ecuația (40)

$$\Delta p = p_c - p_s = \frac{p_{c_0} - v_0}{v_0 + \pi (R^2 - R_0^2) mh} - p_s$$

în care p_s se presupune constant

și

$$F = 2\pi R h m,$$

și pentru m , b , h , valorile medii pe strat, după o serie de transformări se obține ecuația:

$$\frac{\pi_s \ln \frac{1 - \alpha \rho_{i-1}^2}{1 - \alpha \rho_i^2} - \frac{\rho_i^2 - \rho_{i-1}^2}{2}}{\frac{\alpha \rho_i^2 (1 - \rho_0^2 + \rho_i^2)}{1 - \alpha \rho_0^2}} \ln \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} = \quad (54)$$

în care:

$$\pi_s = \frac{p_{c0}}{p_c}; \quad \rho_{i-1} = \frac{R_{i-1}}{l_0}; \quad \rho_i = \frac{R_i}{l_0};$$

$$\rho_{i+1} = \frac{R_{i+1}}{l_0}; \quad l_0 = \sqrt{\frac{v_0}{\pi h m}} \quad (55)$$

și

$$\alpha = \frac{1}{\pi_s - 1 + \rho_0^2}.$$

Dacă spațiul poros inițial al zonei de gaze libere este foarte mare, sau dacă se menține presiunea zăcămintului, prin injectare de gaze, ecuația (54) se simplifică astfel:

$$\ln \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} = \frac{\rho_i^2 - \rho_{i-1}^2}{2\rho_i^2}$$

sau

$$\frac{\rho_{i+1}}{\rho_{i-1}} = \frac{\rho_i}{\rho_{i-1}} \exp \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{\rho_i}{\rho_{i-1}} \right)^2} \right] \right\} \quad (56)$$

ultima ecuație fiind identică cu ecuația (51), care este valabilă pentru regimul cu împingere de apă.

c) *Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele circulare în regim cu împingere de apă și de expansiune a zonei de gaze libere.* Ca și la zăcămintele liniare cu regim mixt, condiția de bază a amplasării raționale este ca, contactul de țitei-apă, și contactul de țitei-gaze să ajungă simultan la ultimul rînd de sonde (galerie). Deci, pentru rezolvarea problemei se procedează ca și la zăcămintele liniare, stabilind însă curbele

$$t_{0-n,1} = f(R) \text{ și } t_{0-n,2} = f(R)$$

după metodele indicate anterior pentru zăcămintele circulare.

d) *Amplasarea rațională a galeriilor în zăcămintele circulare cu regim gravitațional.* Ca și la zăcămintele liniare cu regim gravitațional, pentru exploatarea unui zăcămint circular cu regim gravitațional este suficient un singur rînd de sonde, plasat la marginea de jos a zăcămintului.

6. *Principiile de stabilire a debitului și duratei de exploatare a zăcămintelor de țitei.*

a) *Factorii care determină ritmul de exploatare*

a zăcămintelor. Ritmul de exploatare a unui zăcămint, exprimat prin debitul de fluide care se extrag în unitatea de timp, depinde de două categorii de factori:

— Factorii inerenti zăcămintului, factorii naturali, care în general nu pot fi controlați de om (sau cel mult într-o măsură mică), cum ar fi dimensiunile stratului și înclinarea lui, natura dependenței proprietăților fizice ale rocii și ale fluidelor de presiune și temperatură, etc.

— Factorii care pot fi controlați de către om, în special gabaritul care determină gradul de interferență între sonde și diferența de presiune dintre conturul de alimentare și fundul sondelor.

Gabaritul se determină conform celor expuse anterior.

În ce privește controlul debitului prin determinarea diferenței de presiune dintre conturul de alimentare și fundul sondelor, presiunea de fund a sondelor se poate stabili la o limită minimă, la care extracția mai este rațională. Această limită minimă va fi în orice caz deasupra presiunii de saturație inițială a țiteiului, pentru a preveni ieșirea din soluție a gazelor în strat. Debitul, determinat astfel, asigură ritmul cel mai intens de extracție, în condiții raționale. În multe cazuri însă, acest ritm de extracție nu poate fi asigurat, pentru că trecînd peste un anumit debit, respectiv peste o anumită viteză a fluidelor în zona stratului vecin cu găurile sondelor, se produce o antrenare de material solid din rocă sau o antrenare de apă, care tulbură mersul normal al extracției, putînd duce la încetarea ei prematură (innisipări de sonde, conuri de apă, turtiri de coloane, etc.). În aceste cazuri, ritmul de extracție este determinat printr-un debit-limită, care trebuie stabilit în mod experimental și în funcție de natura zăcămintului respectiv. Rîndurile de sonde cele mai apropiate de contur vor produce de obicei cu debite mai mici decît cele corespunzătoare presiunii-limită minimă. Presiunea de fund a rîndurilor de sonde va scădea pe măsură ce rîndurile vor fi mai departe de contur, pînă ce la un rînd anumit, presiunea de fund va ajunge sub limita minimă admisă. Începînd cu acest rînd, sondele vor trebui să producă sub debitul-limită, și anume, cu un debit, determinat prin presiunea-limită minimă admisă.

În rezumat deci, ritmul de extracție al unui zăcămint se poate controla respectînd condiția:

— unei presiuni-limită, constante la toate sondele, sau

— unui debit-limită constant, îngrădit însă la un moment dat de presiunea-limită.

b) *Metoda de calcul a debitului și duratei de exploatare.* Debitul sondelor, amplasate pe zăcămint după un gabarit cu o anumită formă geometrică și regulată, poate fi calculat conform regulilor hidrodinamice analitice. Rezul-

tatele obținute sînt însă exacte numai pentru o curgere omogenă în strate uniforme, curgere care în realitate nu există. Deci, pentru a putea folosi metoda analitică, se pot introduce în calcul valori medii pentru parametrii zăcămîntului. În cele mai multe cazuri însă, stabilirea acestor valori medii nu este exactă, deci aplicarea metodei analitice, care este și complicată, nu dă rezultate exacte.

Din aceste motive, în aplicarea calculului, rîndul de sonde s-a înlocuit cu galeria; rezultatele de calcul obținute sînt și ele aproximative, însă calculul însuși se simplifică în mod considerabil. Pentru a afla debitul unui rînd de sonde din debitul galeriei corespunzătoare

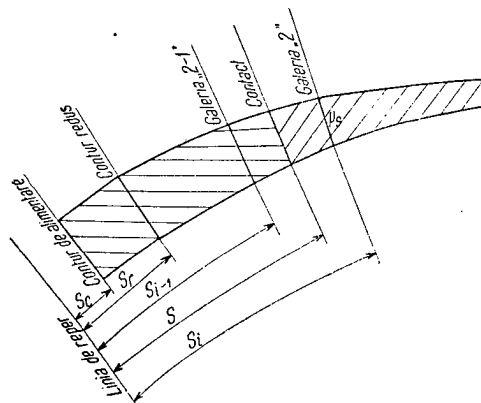


Fig. 31. Etapa i de exploatare a unui zăcămînt.

toare, acesta se înmulțește cu un factor de corecție φ_g , care nu este altceva decît raportul dintre debitul rîndului de sonde, conform calculului analitic și debitul galeriei; factorul φ_g se stabilește o singură dată pentru un anumit gabarit.

Durata de exploatare a unui zăcămînt se împarte în etape, fiecare etapă fiind determinată prin timpul de deplasare a contactului țitei-agent motor între două rînduri consecutive de sonde. Deci prima etapă cuprinde timpul de înaintare a contactului inițial pînă la primul rînd de sonde, a doua etapă timpul de înaintare a contactului de la primul rînd pînă la rîndul al doilea, etapa i cuprinde timpul de avansare a contactului de la rîndul $i-1$ pînă la rîndul i, etc. (v. fig. 31).

Aplicînd ecuațiile (35) și (38) pentru galeria i, în etapa i de exploatare, la schema hidrodinamică a unui zăcămînt — conform fig. 31 — pentru debitul galeriei i, în etapa i se obține:

$$Q_i = \frac{\Delta p}{\mu_a \int_{s_c}^s \frac{ds}{kF} + \mu_t \int_s^{s_i} \frac{ds}{kF}} \quad (57)$$

și pentru durata de exploatare a etapei i:

$$t_i = \int_{s_{i-1}}^{s_i} \frac{m}{\Delta p} R(s) ds = \int_{s_{i-1}}^{s_i} \frac{m}{\Delta p} F \left[\mu_a \int_{s_c}^s \frac{ds}{kF} + \mu_t \int_s^{s_i} \frac{ds}{kF} \right] ds \quad (58)$$

Conform celor menționate anterior la deducția ecuației (35), valoarea debitului Q_i al galeriei i, stabilită prin ecuația (57), nu este constantă în timp. Aceasta se datorește faptului că în strat curg, simultan, două fluide cu diferite viscozități, agentul motor cu viscozitatea μ_a și țiteiul cu viscozitatea μ_t și în adevăr, numitorul părții drepte a ecuației (57) este variabil, în funcție de s, adică de poziția contactului.

În practică se impune deci stabilirea unui debit mediu pe durata etapei i, conform ecuației:

$$Q_{im} \cdot t_i = \int_0^{t_i} Q_i dt \quad (59)$$

în care:

Q_{im} este debitul mediu pe etapa i;

t_i — durata etapei i, conform ecuației (58).

Folosind ecuația (36) se poate scrie:

$$Q_{im} \cdot t_i = \int_{s_{i-1}}^{s_i} m F ds \quad (60)$$

din care se poate calcula valoarea lui Q_{im} . Calculul lui Q_{im} — după această metodă — este complicat. În vederea simplificării, curgerea bifazată în strat se înlocuiește printr-o curgere monofazată — de țitei — în aceleași condiții de presiune. În acest caz, valoarea lui Q_{im} se poate calcula din ecuația (57), cu condiția:

$$\mu_a = \mu_t$$

obținîndu-se:

$$Q_{im} = \frac{\Delta p}{\mu_t \int_{s_r}^{s_i} \frac{ds}{kF}} \quad (61)$$

Conform acestei ecuații, valoarea lui Q_{im} nu mai depinde de poziția contactului, ea este constantă, și s_r marchează poziția unui contur nou de alimentare, aleasă astfel, încît sub acțiunea acestui contur, debitul care rezultă să fie egal cu debitul mediu al galeriei. Acest contur se numește «contur redus de alimentare» și poziția lui, respectiv valoarea lui s_r se poate stabili combinîndu-se ecuațiile (58), (60) și (61), în modul următor:

$$\frac{\Delta p}{\mu_t \int_{s_r}^{s_i} \frac{ds}{kF}} \cdot \int_{s_{i-1}}^{s_i} \frac{m}{\Delta p} R(s) ds = \int_{s_{i-1}}^{s_i} m F ds \quad (62)$$

Prin urmare, dacă se cunoaște poziția conturului redus, toate calculele se pot executa pentru o curgere omogenă cu debit constant, determinată de conturul redus, ceea ce ușurează mersul calculelor considerabil. Poziția conturului redus, respectiv valoarea lui s_r , se găsește prin rezolvarea ecuației (62) în raport cu s_r .

Cunoscînd debitul mediu al galeriei în etapa i , durata ei de exploatare se stabilește împărțind rezerva recuperabilă a porțiunii de la s_{i-1} pînă la s_i , prin debitul mediu.

În privința producției totale a zăcămintului, calculul analitic arată că ea rămîne, în cele mai multe cazuri, aproximativ aceeași, indiferent dacă produce numai rîndul de sonde de lîngă contact, sau dacă produc simultan și alte rînduri. Deci valoarea Q_{im} pentru galeria i din etapa i , reprezintă totodată producția întregului zăcămint în etapa i .

Durata totală de exploatare se stabilește adunînd duratele de exploatare ale tuturor etapelor.

Rezultatele care se obțin din calculele expuse anterior, suferă oarecare modificări, datorită condițiilor reale de exploatare a zăcămintelor, și anume:

— Suprafața de contact dintre țiței și agentul motor care, la început, este orizontală și plană, își schimbă forma în cursul exploatării, deoarece diferitele puncte ale acestei suprafețe se află la distanțe diferite de centrul de depresiune, pe care-l reprezintă rîndul de sonde. Afară de aceasta, datorită întinderii finite a suprafeței de contact, inundarea sondelor nu se produce decît treptat. Se recomandă a se merge cu inundarea sondelor unui rînd, pînă la circa 40%, lăsînd extragerea restului de țiței din zăcămint pe seama rîndului următor de sonde.

— Din cauza neuniformității stratului (porozitate, permeabilitate), avansarea contactului nu este uniformă, necesitînd un control continuu din partea operatorului; din acest motiv, sondele unui rînd nu se vor inunda toate simultan.

— Prezența, pe lîngă țiței, a gazelor în strat micșorează permeabilitatea efectivă față de țiței. Deci, dacă se introduce în calcul o valoare medie pentru permeabilitate, debitele calculate vor fi la început mai mici decît cele reale și, spre sfîrșit, mai mari. Într-o măsură oarecare, aceste diferențe se vor compensa, astfel încît debitul mediu calculat pe toată durata de exploatare se va apropia de cel real.

7. Determinarea conturului redus de alimentare la zăcămintele liniare. a) Zăcămintele liniare în regim cu împingere de apă. Schema zăcămintului este reprezentată în fig. 32.

Ecuația (62):

$$\frac{\Delta p}{\mu_t} \int_{s_i}^{s_{i+1}} \frac{ds}{kF} \cdot \int_{s_{i-1}}^{s_i} \frac{m}{\Delta p} R(s) ds = \int_{s_{i-1}}^{s_i} m F ds$$

cu notațiile din fig. 32 și luînd drept linie de reper galeria i are forma:

$$\frac{\Delta p}{\mu_t} \int_{L_{ri}}^0 \frac{dL}{kF} \cdot \int_{L_{i-1}}^0 \frac{m}{\Delta p} R(L) dL = \int_{L_{i-1}}^0 m F dL \quad (63)$$

în care:

$$R(L) = F \left[\mu_a \int_{L_{ci}}^L \frac{dL}{kF} + \mu_t \int_L^0 \frac{dL}{kF} \right]$$

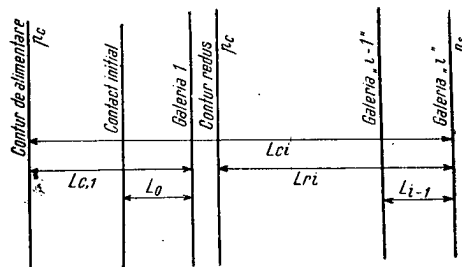


Fig. 32. Determinarea conturului redus de alimentare la zăcămintele liniare în regim cu împingere de apă.

Dacă se consideră constante:

$\Delta p = \Delta p_m$ lățimea stratului, cum și m , k , F , pentru care se introduc valorile medii, se obține:

$$R(L) = \frac{1}{k} [(\mu_a - \mu_t) L - \mu_a L_{ci}]$$

Apoi introducînd această expresie pentru $R(L)$ în ecuația (63), și rezolvînd-o în raport cu L_{ri} , pentru rîndul « i » se obține în forma finală:

$$L_{ri} = \frac{\mu_a}{\mu_t} \left(L_{ci} - \frac{L_{i-1}}{2} \right) + \frac{L_{i-1}}{2} \quad (64)$$

(pentru notațiile L_{ci} , L_{i-1} și L_{ri} , v. fig. 32).

Este de observat că, în realitate, valoarea permeabilității nu este constantă. În zona ocupată inițial de apă, permeabilitatea este cea absolută, în timp ce pentru zona inundată ulterior de apă, cum și pentru zona ocupată de țiței, ar urma să se introducă în calcul permeabilitatea efectivă față de apă, respectiv permeabilitatea efectivă față de țiței*).

Din ecuația (64) se vede ușor că distanța dintre galerie și conturul redus variază de la galerie la galerie, respectiv de la o etapă la alta. Pentru prima galerie, respectiv prima etapă, se va introduce — pentru L_{i-1} — valoarea pentru L_0 , adică distanța dintre contactul inițial și prima galerie, și pentru L_{ci} , valoarea L_{ci} .

*) Vezi Docladî Academii Nauk U.R.S.S. vol. XCI, Nr. 6, 1953.

Tot din ecuația (64) se vede că pentru cazul:

$$\mu_a < \mu_t, \quad L_{ri} < L_{ci}$$

și pentru cazul:

$$\mu_a > \mu_t, \quad L_{ri} > L_{ci}$$

b) Zăcămintele liniare cu regim de expansiune a zonei de gaze libere.

1) Presiunea în zona de gaze este constantă. Acest caz se întâmplă cînd zona de gaze libere este relativ mare față de zona de țiței, sau cînd se execută o operație de menținere a presiunii, prin injectare de gaze.

Schema zăcămintului este reprezentată în

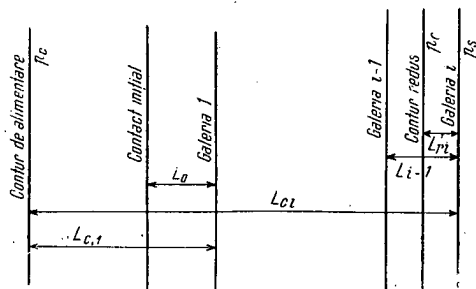


Fig. 33. Determinarea conturului redus la zăcămintele liniare cu regim de expansiune a zonei de gaze libere, presiunea în zona de gaze fiind constantă.

fig. 33. Dacă se presupun constante:

Lățimea stratului și valorile pentru k , m și F , pentru care se introduc valorile medii, avînd în vedere că și $\Delta p = \text{constant}$, pentru determinarea conturului redus se poate folosi ecuația (64), în care însă viscozitatea gazelor se poate neglija, fiind relativ mică față de viscozitatea țițeiului.

Introducînd în ecuația (64), $\mu_a = 0$, se obține:

$$L_{ri} = \frac{L_{i-1}}{2} \quad (65)$$

Pentru stabilirea conturului redus în prima etapă de exploatare se va introduce, în ecuația (65), pentru L_{i-1} valoarea L_0 .

2) Presiunea în zona de gaze libere este variabilă. Dacă nu se extrag gaze direct din zona de gaze libere și dacă nici nu intră gaze în ea, presiunea scade continuu, pe măsură ce contactul avansează. Deoarece în aceste condiții, determinarea conturului redus pe cale analitică este complicată, se folosește metoda aproximativă, următoare:

Se împart zonele de țiței între cîte două rînduri, în mai multe porțiuni, astfel încît, în fiecare porțiune, presiunea să se poată considera aproximativ constantă. În acest caz, în fiecare porțiune, conturul redus se află — în concordanță cu ecuația (65) — la jumătatea porțiunii. Astfel, o etapă de exploatare se subîmparte în mai multe subetape cu pre-

siune constantă, care se poate calcula după ecuația:

$$p_c = \frac{p_{c0} \cdot v_0 + Q_g}{v_0 + v(L)} \quad (66)$$

în care:

p_{c0} este presiunea în zona de gaze, în etapa precedentă;

Q_g — volumul gazelor injectate sau extrase în m^3N ;

v_0 — spațiul poros al zonei de gaze, în etapa precedentă;

$v(L) = m \cdot b \cdot h \cdot L$ — spațiul poros, evacuat de țiței, unde b este lățimea stratului.

8. Determinarea conturului redus de alimentare, la zăcămintele circulare.

a) Zăcămintele circulare în regim cu împingere de apă. Schema zăcămintului este reprezentată în fig. 34.

Se presupun constante: m , k , h , și Δp .

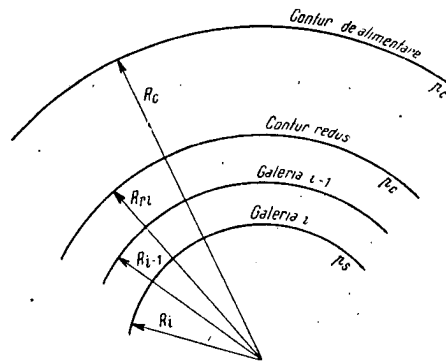


Fig. 34. Determinarea conturului redus la zăcămintele circulare de regim cu împingere de apă.

Se folosește ecuația (62) care, cu notațiile din fig. 34 și cu centrul zăcămintului ca punct de reper, devine:

$$\frac{\Delta p}{\mu + \int_{R_{ri}}^{R_i} \frac{dR}{kF}} \int_{R_{i-1}}^{R_i} \frac{m}{\Delta p} \mathcal{R}(R) dR = \int_{R_{i-1}}^{R_i} m F dR \quad (67)$$

Introducînd:

$$F = 2\pi R h$$

în ecuația (36) și în $\mathcal{R} = \mathcal{R}(R)$ se obține:

$$\begin{aligned} \mathcal{R}(R) &= F \left[\mu_0 \int_{R_c}^R \frac{dR}{kF} + \mu_t \int_R^{R_i} \frac{dR}{kF} \right] = \\ &= \frac{R}{k} \left(\mu_0 \ln \frac{R}{R_c} + \mu_t \ln \frac{R_i}{R} \right) \end{aligned}$$

Introducând relația menționată pentru $R(R)$, în ecuația (67), și pe aceasta rezolvând-o prin raport cu R_{ri} , se obține:

$$R_{ri} = \frac{R_c^{\mu_a} \cdot R_{i-1} \frac{1 - (\mu_a/\mu_t)}{1 - (R_i^2/R_{i-1}^2)}}{e^{\frac{1 - (\mu_a/\mu_t)}{2}} \cdot R_i \frac{1 - (\mu_a/\mu_t)}{1 - (R_{i-1}^2/R_i^2)}}} \quad (68)$$

în care e este baza logaritmilor naturali.

Cind $\mu_a < \mu_t$, $R_{ri} < R_c$ și

cind $\mu_a > \mu_t$, $R_{ri} > R_c$.

Pentru prima etapă de exploatare se introduce

$$R_{ri} = R_0$$

raza contactului inițial de țitei-apă.

b) Zăcămintele circulare cu regim de expansiune a zonei de gaze libere. Schema zăcămintului este reprezentată în fig. 35.

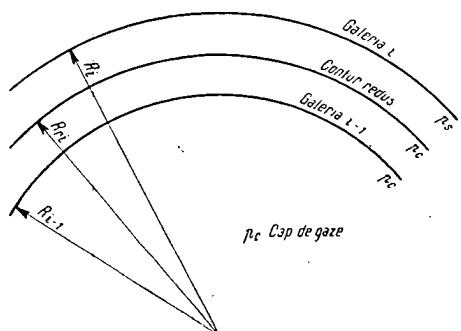


Fig. 35. Determinarea conturului redus la zăcămintele circulare.

Pentru cazul cind volumul zonei de gaze este relativ mare, sau cind presiunea ei se menține constantă printr-o operație de injectare, se poate considera: $\Delta p = \text{constant}$.

Dacă se mai presupune că m , k și h sînt constante pentru determinarea conturului redus se poate folosi ecuația (68), în care viscozitatea gazelor se poate neglija, adică:

$$\mu_a = 0.$$

Astfel, din ecuația (68) se obține:

$$R_{ri} = \frac{R_{i-1} \frac{1 - (R_i^2/R_{i-1}^2)}{1 - (R_{i-1}^2/R_i^2)}}{\sqrt{e} R_i \frac{1 - (R_{i-1}^2/R_i^2)}{1 - (R_i^2/R_{i-1}^2)}} \quad (69)$$

Pentru prima etapă de exploatare se introduce

$$R_{i-1} = R_0$$

raza inițială a zonei de gaze libere.

Pentru cazul cind presiunea în zona de gaze variază, se folosește în mod analog metoda aproximativă, indicată pentru zăcămintele liniare, împărțind fiecare etapă în subetape, cu presiunea constantă în zona de gaze care se stabilește cu ecuația (66)

$$p_c = \frac{p_{c0} \cdot v_0 + Q_g}{v_0 + v(R)} \quad (70)$$

în care $v(R) = \pi h (R_n^2 - R_{n-1}^2) m$, spațiul de pori, evacuat de țitei, R_n și R_{n-1} fiind razele corespunzătoare fiecărei subetape.

Cele menționate în legătură cu valorile diferite ale permeabilității în zonele de apă, respectiv țitei, pentru zăcămintele liniare, sînt bineînțelese valabile și pentru zăcămintele circulare.

9. Determinarea debitului zăcămintelor, exploatate la presiunea-limită de fund.

a) Zăcămintele liniare. 1. Zăcămintele liniare în regim cu împingere de apă sau de expansiune a zonei de gaze libere sub presiune constantă. Schemele acestor zăcămintele sînt reprezentate în fig. 36. Conform celor expuse la punctul e. 6. b) pentru debitul unui rînd de sonde se poate forma ecuația:

$$Q_r = Q_g \varphi_g \quad (71)$$

în care:

Q_r este debitul rîndului;

Q_g — debitul galeriei corespunzătoare;

φ_g — factorul de corecție.

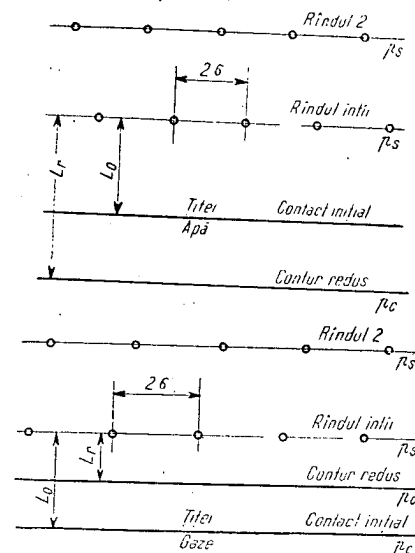


Fig. 36. Determinarea debitului zăcămintelor liniare în regim cu împingere de apă sau de expansiune a zonei de gaze libere cu presiune constantă a zonei agent-motor.

Debitul unui element de rînd, cu lungimea 2σ (v. fig. 36), deci debitul unei sonde se stabilește cu ecuația

$$q = \frac{2\sigma h k \Delta p_g}{\mu_t L_r} \quad *) \quad (72)$$

în care:

q este debitul sondei, cm^3/s ;
 2σ — lungimea elementului de rînd, egală cu distanța dintre sonde, în cm;
 h — grosimea stratului, în cm;
 k — permeabilitatea stratului, darcy;
 $\Delta p = p_c - p_s$ — în at;
 μ_t — viscozitatea țiteiului, în cP;
 L_r — distanța conturului redus pînă la rîndul de sonde, determinată cu ecuația (64), în cm.

în care:

r_s este raza sondelor, și celelalte notații, ca și cele precedente. De aici reiese:

$$\varphi_g = \frac{\frac{2\pi k h \Delta p}{\mu L_r} \left[\ln \frac{\sigma}{\pi r_s} + \ln 2 \operatorname{sh} \frac{\pi L_r}{\sigma} \right]}{\frac{2\pi k h \Delta p}{\mu L_r}} = \frac{\pi L_r}{\sigma \left[\ln \frac{\sigma}{\pi r_s} + \ln 2 \operatorname{sh} \frac{\pi L_r}{\sigma} \right]} \quad (74)$$

De obicei la zăcămintele în regim cu împingere de apă

$$\sigma \leq L_r$$

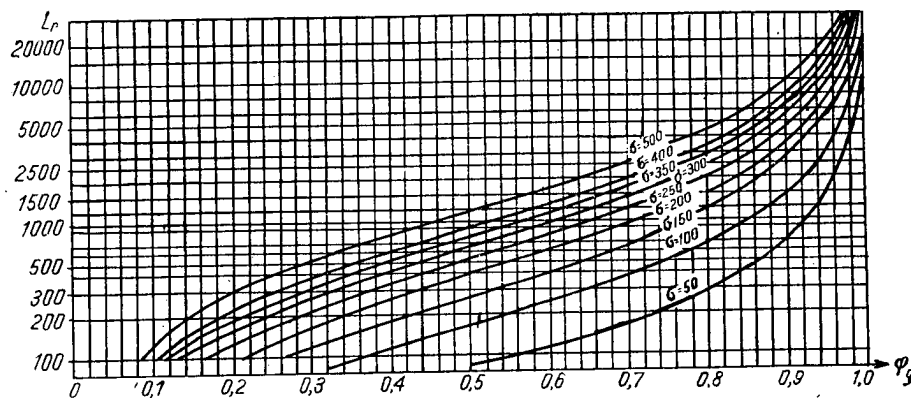


Fig. 37. Factorul de corecție φ_g pentru un zăcămint liniar, dacă se consideră debitul unui singur rînd de sonde.

Debitul q , stabilit din ecuația (72), este debitul mediu al elementului de rînd, în timpul deplasării contactului inițial pînă la rîndul de sonde.

Pentru stabilirea factorului de corecție φ_g , se determină raportul dintre debitul rîndului, obținut prin calculul lui analitic, și debitul galeriei.

După calculul analitic, debitul unui rînd de sonde care produce singur într-un zăcămint liniar este:

$$Q_r = \frac{2\pi k h \Delta p}{\mu \left(\ln \frac{\sigma}{\pi r_s} + \ln 2 \operatorname{sh} \frac{\pi L_r}{\sigma} \right)} \quad (73)$$

*) Sonda însăși fiind presupusă perfectă din punct de vedere hidrodinamic.

și, în aceste condiții, ecuația (74) se reduce la:

$$\varphi_g = \frac{1}{\frac{\sigma}{\pi L_r} \ln \frac{\sigma}{\pi r_s} + 1} \quad (75)$$

În fig. 37 se reprezintă o serie de diagrame care dau valoarea φ_g în funcție de L_r pentru diferite valori de σ conform calculelor anterioare, dacă raza sondelor este de 10 cm.

Avînd în vedere că debitul unui rînd de sonde care exploatează singur un zăcămint este aproximativ egal cu suma debitelor mai multor rînduri de sonde, prin care se exploatează simultan zăcămintul, se poate admite că ecuația (72) dă debitul întregului zăcămint, pe lungimea 2σ .

În fig. 38 este reprezentată o serie de diagrame pentru factorul de corecție φ_g , dacă acesta se calculează din debitul a două rînduri

de sonde care produc simultan. Din diagrame se vede că acest factor este puțin mai mare decît cel calculat pentru un singur rînd de sonde (fig. 37), fără însă ca diferențele să fie prea mari.

Bine înțeles ecuația (72) este valabilă și pentru debitul zăcămîntului în etapa i , dacă

în care:

$\Delta p_1 = p_{c1} - p_1$ și $\Delta p_2 = p_{c2} - p_1$ sînt diferențele de presiune dintre cîte un contur de alimentare și sonde;

L_{r1} , L_{r2} — distanțele ultimului rînd de la cele două contururi reduse.

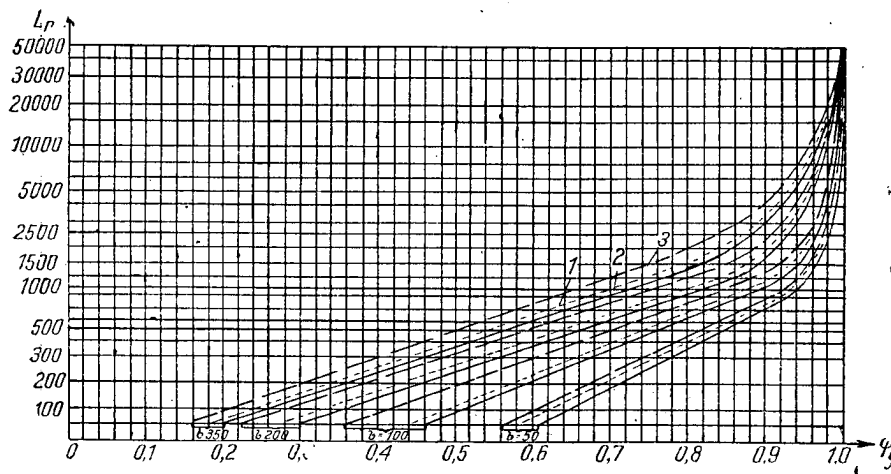


Fig. 38. Factorul de corecție q_g pentru un zăcămînt liniar, dacă se consideră debitul la două rînduri de sonde.

se introduce pentru valoarea corespunzătoare rîndului i , cea corespunzătoare ecuației (64).

Dacă un zăcămînt liniar are două contururi de alimentare de apă (în general două contururi de gaze nu pot exista), cum se vede în fig. 39, debitul lui se calculează ca pentru două

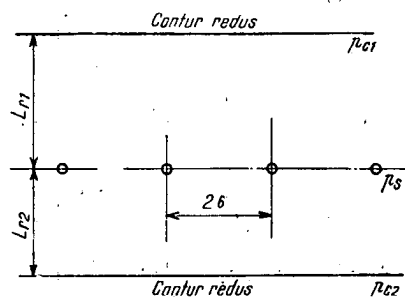


Fig. 39. Zăcămînt liniar cu două contururi de alimentare de apă.

zăcăminte independente. În ce privește ultimul rînd, acesta trebuie astfel amplasat, încît apa să ajungă la el simultan din ambele părți. Debitul unui element al ultimului rînd se calculează după ecuația:

$$q = \frac{2\sigma kh}{\mu_t} \left[\frac{\Delta p_1}{L_{r1}} + \frac{\Delta p_2}{L_{r2}} \right] \cdot \varphi_g \quad (76)$$

În cazul cînd presiunile la cele două contururi de alimentare sînt identice:

$$L_{r1} = L_{r2}$$

și ecuația (45) devine:

$$q = \frac{L_1 \sigma h k \Delta p}{\mu_t L_r} \quad (77)$$

2) Zăcăminte liniare în regim cu împingere de apă și expan-

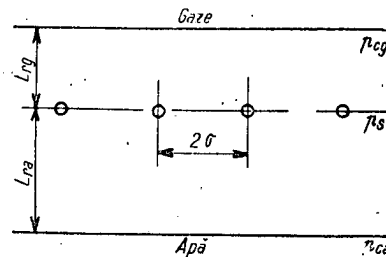


Fig. 40. Zăcămînt liniar cu contur de țiței-gaze și de țiței-apă.

siunea a zonei de gaze libere sub presiune constantă. Schema zăcămîntului este reprezentată în fig. 40.

După ce s-a stabilit poziția rîndurilor, conform celor indicate la punctul 4 c), debitul zăcămîntului se calculează ca pentru două

zăcăminte independente, pînă ce se ajunge la ultimul rînd. Debitul unui element al ultimului rînd se stabilește cu ecuația:

$$q = \frac{2\sigma kh}{\mu_t} \left(\frac{\Delta p_a}{L_{ra}} + \frac{\Delta p_g}{L_{rg}} \right) \cdot \varphi_g \quad (78)$$

în care:

$\Delta p_a = p_{ca} - p_s$, $\Delta p_g = p_{cg} - p_s$ sînt diferențele de presiune dintre conturul de alimentare al apei, respectiv al gazelor și sonde;

L_{ra} , L_{rg} — distanțele ultimului rînd de la cele două contururi reduse, corespunzătoare.

Factorul de corecție φ_g se determină cu ajutorul ecuației:

$$\varphi_g = \frac{1}{\frac{\sigma(L_{rg} + L_{ra})}{\pi L_{rg} \cdot L_{ra}} \ln \frac{\sigma}{\pi r_s} + 1} \quad (79)$$

b) Determinarea debitului zăcămintelor circulare, exploatate la presiunea-limită de fund.
1) Zăcămintele circulare în regim cu împingere de apă. Schema zăcămintului este reprezentată în fig. 41.

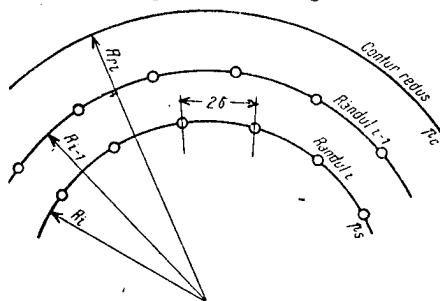


Fig. 41. Determinarea debitului unui zăcămint circular în regim cu împingere de apă.

Conform ecuației (71) se poate scrie:

$$Q_r = Q_g \varphi_g = \frac{2\pi kh}{\mu_r} \frac{\Delta p}{\ln \frac{R_{ri}}{R_i}} \cdot \varphi_g \quad (80)$$

în care:

R_i este raza galeriei i ;

R_{ri} — raza conturului redus pentru galeria i , în etapa de exploatare i .

Valoarea factorului de corecție φ_g se poate afla cu ecuația:

$$\varphi_g = \frac{1}{\frac{\sigma}{\pi R_i} \ln \frac{\sigma}{\pi r_s} + 1} \quad (81)$$

în care

$\sigma = \pi R_i / m$, m fiind numărul sondelor din rîndul i .

Valoarea factorului φ_g s-a stabilit din debitul rîndului i , dacă produce singur. Ca și la zăcămintele liniare, debitul acestui rînd este aproximativ egal cu debitul zăcămintului întreg dacă ar produce mai multe rînduri simultan.

În fig. 42 este reprezentată o nomogramă, care dă valorile lui φ_g , în funcție de R_r , R_i și σ , dacă raza sondei este de 10 cm. Dacă ultimul rînd este reprezentat printr-o singură sondă, valoarea factorului φ_g este egală cu 1.

2) Zăcămintele circulare cu regim de expansiune a zonei de

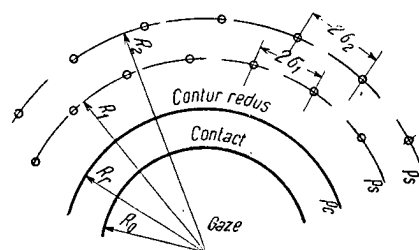


Fig. 43. Determinarea debitului unui zăcămint circular cu regim de expansiune a zonei de gaze libere.

gaze libere. Schema zăcămintului este reprezentată în fig. 43.

La astfel de zăcămintele, aplicarea factorului de corecție φ_g ar da erori prea mari; rezultate apropiate de realitate se obțin calculându-se debitul a cel puțin două rînduri cu ajutorul ecuațiilor, formulate de B. E. Kazarovskaia:

$$q_1 \ln \frac{\rho_1^{m_1} \cdot \rho_2^{m_1} - 1}{\rho_1^{m_1} - \rho_2^{m_1}} + q_2 \ln \frac{\rho_2^{m_2} - 1}{m_2 \rho_2^{m_2-1} \cdot \rho_s} = \frac{2\pi kh \Delta p}{\mu_t} \quad (82)$$

$$q_1 \ln \frac{(\rho_1^{2m_1} - 1)(\rho_1^{m_1} - \rho_2^{m_2})}{m_1 \rho_1^{m_1-1} (\rho_1^{m_1} \cdot \rho_2^{m_2} - 1) \rho_s} - q_2 \ln \frac{(\rho_1^{m_2} - \rho_2^{m_2})(\rho_2^{2m_2} - 1)}{m_2 \rho_2^{m_2-1} (\rho_1^{m_2} \cdot \rho_2^{m_2} - 1)} = 0$$

în care:

q_1, q_2 este debitul unei sonde din primul, respectiv din cel de al doilea rînd;

m_1, m_2 — numărul sondelor din primul, respectiv din cel de al doilea rînd

$$\rho_1 = \frac{R_1}{R_r}; \quad \rho_2 = \frac{R_2}{R_r}; \quad \rho_s = \frac{r_s}{R_r}.$$

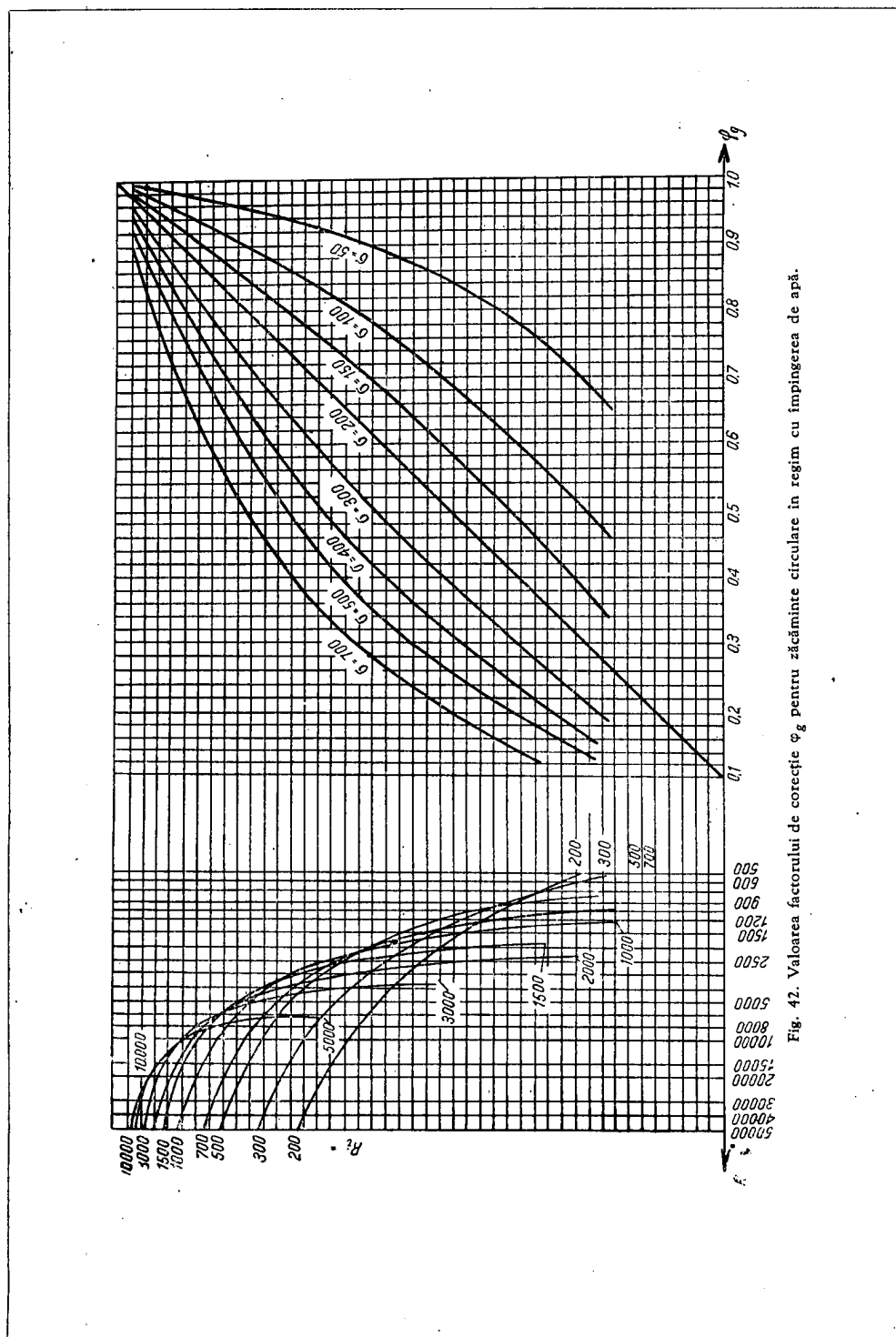


Fig. 42. Valoarea factorului de corecție ϕ_g pentru zăcămintele circulare în regim cu împingerea de apă.

Dacă produce numai un singur rând de sonde, debitul lui va fi:

$$Q \cong \frac{2\pi kh}{\mu_t} \cdot \frac{m_1 \Delta p}{\ln \frac{R_1}{mr_s} + m \ln \frac{R_1}{R_r}} \quad (83)$$

în care

m este numărul sondelor din rândul care produce.

c) Determinarea debitului zăcămintelor ovale, exploatate la presiunea-limită de fund.

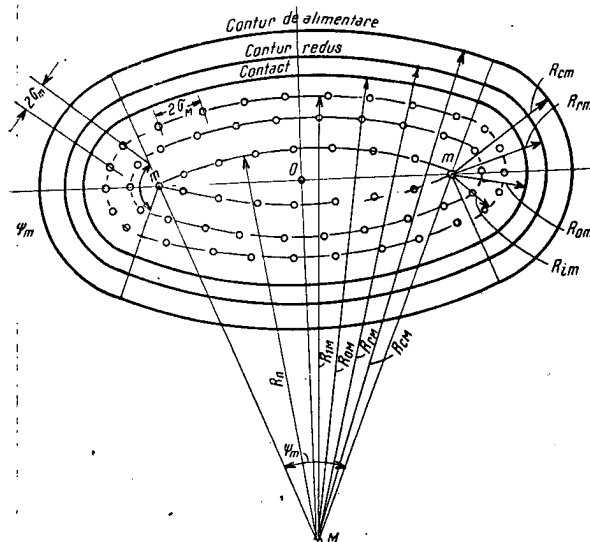


Fig. 44. Determinarea debitului unui zăcămint oval în regim cu împingere de apă

1) Zăcămintele ovale în regim cu împingere de apă. În cazul când raportul dintre axa mică și axa mare ale unui zăcămint oval este mai mare decât 2/3, calculul debitului se execută ca pentru un zăcămint circular cu aceeași suprafață. Amplasarea sondelor se face pe rânduri, paralele cu contactul țitei-agent motor.

În cazul însă când raportul dintre axa mică și axa mare ale zăcămintului este mai mic decât 2/3, la calculul debitului trebuie să se ia în considerare ovalitatea zăcămintului. Un astfel de zăcămint se consideră compus din două sectoare de cerc, cu centrele M , sectoarele « mari » (v. fig. 44) și din două sectoare de cerc, cu centrele m , sectoarele « mici ». În sectoarele mari, rândurile de sonde formează arce de cerc cu centrele M , până la arcul care trece prin centrele m , având raza R_n . Suprafața dintre arcele de cerc, cu raza R_n , se exploatează printr-un rând de sonde, amplasate pe axa mare a ovalului, rândul central. Dacă săgeata segmentului cu raza R_n

între punctele $m - m$, este mai mare decât $3\sigma_M$, între rândul central de sonde și rândul cu raza R_n se mai intercalează un rând intermediar de sonde. Raportul dintre distanțele dintre sondele sectoarelor mari $2\sigma_M$ și distanțele dintre sondele sectoarelor mici $2\sigma_m$, trebuie să fie astfel, încât avansarea contactului de țitei-apă să fie uniformă în toate sectoarele. Calculul se execută în felul următor:

— Razele contururilor reduse se determină cu ecuația (68).

— Debitul unui sector mare cu raza R_{1M} se determină cu ecuația (80), înlocuind în ea valoarea 2π cu valoarea ψ_M , adică:

$$Q_M = \frac{\psi_M kh}{\mu_t} \cdot \frac{\Delta p}{\ln \frac{R_{1M}}{R_{1M}}} \varphi_{gM} \quad (84)$$

în care:

ψ_M este unghiul arcului sectorului mare;

R_{rM} , R_{1M} — razele conturului redus, respectiv a primului rând de sonde.

— Factorul de corecție φ_{gM} se determină cu ecuația (81) sau cu ajutorul fig. 42.

— Debitul sectoarelor mari ale zăcămintului în etapele următoare se stabilește în mod analog, după cele expuse la zăcămintele circulare în regim cu împingere de apă.

— Debitul rândului central de sonde se calculează cu o aproximație suficientă, considerând rândul ca un arc de cerc, cu raza MO (O fiind centrul ovalului).

— În ce privește debitul unui sector mic, acesta se alege dinainte astfel, încât timpul de deplasare a contactului țitei-apă până la primul rând de sonde să fie egal cu timpul de deplasare a contactului din sectorul mare. Deci:

$$t_M = \frac{\frac{\psi_M}{2} (R_{oM}^2 - R_{1M}^2) \cdot m \cdot h \cdot \varepsilon \cdot S_{t_0}}{Q_M} =$$

$$= t_m = \frac{\frac{\psi_m}{2} (R_{om}^2 - R_{1m}^2) \cdot m \cdot h \cdot \varepsilon \cdot S_{t_0}}{Q_m} \quad (85)$$

în care:

t_M , t_m — timpul de deplasare în sectorul mare, respectiv în sectorul mic;

R_{oM}, R_{om} — raza conturului de țiței-apă în sectorul mare, respectiv în sectorul mic;
 R_{iM}, R_{im} — raza primului rînd de sonde în sectorul mare, respectiv în sectorul mic;
 ε — coeficientul de extracție care se poate obține la regimul zăcămintului;
 S_{t_0} — saturația inițială cu țiței a zăcămintului;
 ψ_M, ψ_m — unghiul arcului sectorului mare, respectiv al sectorului mic;
 Q_M, Q_m — debitul sectorului mare, respectiv al sectorului mic.

Introducînd în ecuația (85) pentru:

$$Q_M = \frac{\psi_M k h \Delta p}{\mu_t \ln \frac{R_{rM}}{R_{iM}}} \varphi_{gM}$$

și pentru:

$$Q_m = \frac{\psi_m k h \Delta p}{\mu_t \ln \frac{R_{rm}}{R_{im}}} \varphi_{gm}$$

se obține:

$$\varphi_{gm} = \frac{R_{om}^2 - R_{im}^2}{R_{oM}^2 - R_{iM}^2} \cdot \frac{\ln \frac{R_{rm}}{R_{im}}}{\ln \frac{R_{rM}}{R_{iM}}} \varphi_{gM} \quad (86)$$

în care:

φ_{gm} este factorul de corecție pentru debitul sondelor din sectorul mic;

R_{rM}, R_{rm} — raza conturului redus în sectorul mare, respectiv în sectorul mic.

După ce s-a stabilit valoarea lui φ_{gm} din ecuația (86), se determină cu ajutorul fig. 42 valoarea corespunzătoare pentru distanța dintre sondele din sectorul mic.

Dacă din aplicarea ecuației (86) se obține $\varphi_{gm} > 1$, această înseamnă că un singur rînd de sonde în sectorul mic nu va putea asigura o avansare a contactului, uniformă, atît în sectorul mic, cît și în sectorul mare. Deci va trebui ca în sectorul mic să se amplaseze cîte două rînduri de sonde, pentru fiecare rînd din sectorul mare.

— În mod similar se stabilesc, pentru sectoarele mici, debitele și distanțele dintre sonde ale etapelor, respectiv ale rîndurilor următoare, pînă ce se ajunge la sondele centrale

din punctele m , ale căror debite se calculează înlocuindu-se ψ_m cu 2π .

Debitul întregului zăcămint este egal cu suma debitelor celor patru sectoare.

2) Zăcămintele ovale cu regim de expansiune a zonei de gaze libere. Ca și la zăcămintele ovale cu regim cu împingere de apă, zăcămintul se împarte în două sectoare « mari » și două sectoare « mici », considerate părți ale unor zăcămintele circulare, cu regim de expansiune a zonei de gaze libere.

Debitul unui sector mare se stabilește, pentru cîte două rînduri, cu ecuația (82).

Pentru stabilirea distanței dintre sonde, într-un sector mic, în vederea avansării uniforme a contactului în toate sectoarele, se folosește ecuația (85), în care se introduce pentru

$$Q_M = Q_{1M} + Q_{2M}$$

$$Q_m = Q_{1m} + Q_{2m}$$

Pentru Q_{1M} , respectiv Q_{2M} se introduce pe rînd mai multe valori, determinate prin mai multe valori de numere de sonde, alese arbi-

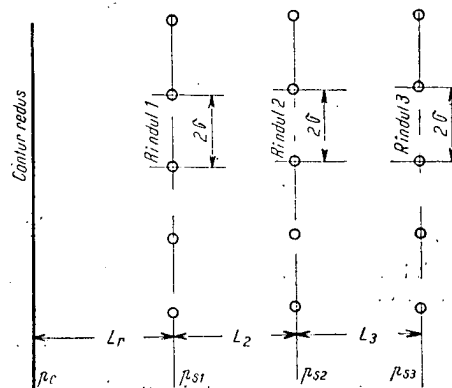


Fig. 45. Determinarea debitului unui zăcămint liniar, producînd cu debite-limită.

trar pe fiecare rînd din sectorul mic, pînă ce partea dreaptă a ecuației (85) devine egală cu partea stîngă. Numerele de sonde, prin care se satisface această condiție, sînt cele căutate și din ele se pot stabili distanțele dintre sonde, conform relației:

$$\sigma_i = \frac{\pi R_i}{m_i} \quad (87)$$

dacă:

σ_i este distanța dintre sonde;

R_i — raza rîndului de sonde;

m_i — numărul sondelor unui rînd.

10. Determinarea debitului zăcămintelor cu debite-limită.

a) Zăcămintele liniare în regim cu împingere de apă sau în regim de expansiune a zonei de gaze libere sub presiuni constante. Schema zăcămintului este reprezentată în fig. 45.

Se presupune că pentru toate rîndurile de sonde, distanța dintre sonde și presiunea-limită de fund, minime admisibile, sînt aceleași.

Debitul zăcămintului în prima etapă de exploatare, adică pînă la inundarea primului rînd de sonde, se stabilește în felul următor:

— Se calculează debitul pe care l-ar avea o sondă din primul rînd, dacă presiunea ei de fund ar fi presiunea-limită:

$$q_1 = \frac{2\sigma kh \Delta p}{\mu_t L_r} \varphi_{g1} \quad (88)$$

în care:

q_1 este debitul unei sonde din primul rînd;

$\Delta p = p_c - p_s$, p_s fiind presiunea-limită de fund;

L_r — distanța primului rînd de la conturul ei redus;

φ_{g1} — factorul de corecție pentru primul rînd.

Dacă se notează cu q_{lim} debitul-limită, și dacă din ecuația (88) reiese:

$$q_1 < q_{lim}$$

exploatarea primului rînd și totodată a zăcă-

$$q_n = \frac{2\sigma kh (p_c - p_s) - q_{lim} \mu_t [(n-1)L_r + (n-2)L_2 + \dots + L_{n-1}]}{\mu_t \left[\frac{L_n}{\varphi_{gn}} + L_r + \sum_{i=2}^{i=n-1} L_i \right]} \quad (92)$$

mîntului întreg se va face numai prin primul rînd, cu debitul:

$$q = q_1 \quad (89)$$

pentru fiecare sondă, care va lucra cu presiunea-limită de fund.

— Dacă însă din ecuația (88) reiese:

$$q_1 > q_{lim},$$

sondele din primul rînd se vor exploata cu debitul q_{lim} . În acest caz, sondele din primul rînd vor avea o presiune de fund, p_{s1} , care este mai mare decît presiunea-limită, p_s , și vor produce și sondele din cel de al doilea rînd al căror debit se stabilește cu ecuațiile:

$$q_2 = \frac{2\sigma kh (p_{s1} - p_s)}{\mu_t L_2} \varphi_{g2}$$

și

$$q_1 + q_2 = q_{lim} + q_2 = q_{lim} +$$

$$+ \frac{2\sigma kh (p_{s1} - p_s)}{\mu_t L_2} \varphi_{g2} = \frac{2\sigma kh (p_c - p_{s1})}{\mu_t L_r}.$$

Eliminînd p_{s1} din aceste două ecuații și rezolvînd în raport cu q_2 se obține:

$$q_2 = \frac{2\sigma kh (p_c - p_s) - q_{lim} \mu_t L_r}{\mu_t \left[\frac{L_2}{\varphi_{g2}} + L_r \right]} \quad (90)$$

Dacă din ecuația (90) reiese:

$$\sum q_2 < q_{lim}$$

sondele din cel de al doilea rînd vor produce cu debitul q_2 la presiunea-limită de fund, și debitul unui element de zăcămint, cu lățimea 2σ va fi:

$$\sum q = q_{lim} + q_2 \quad (91)$$

Dacă însă, din ecuația (90) reiese că:

$$q_2 > q_{lim}$$

în acest caz și sondele din cel de al doilea rînd vor produce debitul-limită q_{lim} la o presiune de fund p_{s2} , care este mai mare decît presiunea-limită p_s . Debitul sondelor din cel de al treilea rînd se stabilește în mod asemănător ca și pentru cel de al doilea rînd.

— În general pentru debitul sondelor rîndului n , care lucrează cu presiunea-limită se obține:

și dacă $q_n > q_{lim}$ debitul unui element de zăcămint, cu lățimea 2σ este:

$$\sum_{i=1}^{i=n} q_i = (n-1) q_{lim} + q_n \quad (93)$$

Cu debitul-limită nu lucrează, în realitate, decît două, pînă la trei rînduri de sonde.

Debitul zăcămintului în etapa a doua, adică după ce contactul a ajuns la primul rînd, se calculează în mod analog: Considerîndu-se cel de al doilea rînd drept primul, se determină pentru el conturul redus, iar cel de al treilea rînd se consideră drept al doilea și așa mai departe, se repetă aplicarea metodei expuse.

Analog se procedează în etapele următoare.

b) *Determinarea debitului zăcămintelor circulare cu debite-limită.*

1) *Zăcămintele cu regim de împingerea apei.* Schema zăcămintului este reprezentată în fig. 46.

În prima etapă de exploatare, debitul zăcămintului se stabilește în felul următor:

— Se calculează debitul pe care l-ar avea primul rând, dacă presiunea de fund ar fi egală cu presiunea-limită.

$$Q_1 = \frac{2\pi kh \Delta p}{\mu_t \ln \frac{R_r}{R_1}} \varphi_{g1} \quad (94)$$

în care:

Q_1 este debitul primului rând de sonde;
 $\Delta p = p_c - p_s$ — diferența dintre presiunea de contur și presiunea-limită;
 R_1 — raza primului rând;
 R_r — raza conturului redus, pentru primul rând, după ecuația (68);
 φ_{g1} — factorul de corecție, pentru primul rând, după ecuația (81) sau fig. 42.

Dacă se notează cu q_{lim} debitul-limită al unei sonde, și cu $2\sigma_1$, distanța dintre sondele primului rând, și dacă din ecuația (94) reiese:

$$Q_1 < \frac{\pi R_1}{\sigma_1} \cdot q_{lim}$$

în care $\frac{\pi R_1}{\sigma_1} = m_1$ adică numărul sondelor din primul rând, exploatarea primului rând și totodată a zăcămintului întreg se va face numai prin primul rând, cu debitul:

$$Q = Q_1 \quad (95)$$

și sondele vor lucra cu presiunea-limită de fund.

Dacă însă din ecuația (94) reiese:

$$Q_1 > \frac{\pi R_1}{\sigma_1} \cdot q_{lim}$$

sondele din primul rând se vor exploata cu debitul-limită q_{lim} ; presiunea de fund a acestor sonde, p_{s1} va fi mai mare decât presiunea-limită, p_s și în acest caz vor produce și sondele celui de al doilea rând al cărui debit se stabilește cu ecuațiile:

$$Q_2 = \frac{2\pi kh (p_{s1} - p_s)}{\mu_t \ln \frac{R_1}{R_2}} \varphi_{g2}$$

$$Q_1 + Q_2 = q_{lim} \frac{\pi R_1}{\sigma_1} + \frac{2\pi kh (p_{s1} - p_s)}{\mu_t \ln \frac{R_1}{R_2}} \varphi_{g2} = \frac{2\pi kh (p_c - p_{s1})}{\mu_t \ln \frac{R_r}{R_1}}$$

Din aceste două ecuații reiese:

$$Q_2 = \frac{2\pi kh (p_c - p_s) - m_1 q_{lim} \mu_t \ln \frac{R_r}{R_1}}{\mu_t \left[\frac{\ln (R_1/R_2)}{\varphi_{g2}} + \ln \frac{R_r}{R_1} \right]} \quad (96)$$

în care $m_1 = \frac{\pi R_1}{\sigma_1}$, adică numărul sondelor primului rând.

Dacă din ecuația (96) reiese:

$$Q_2 < \frac{\pi R_2}{\sigma_2} q_{lim}$$

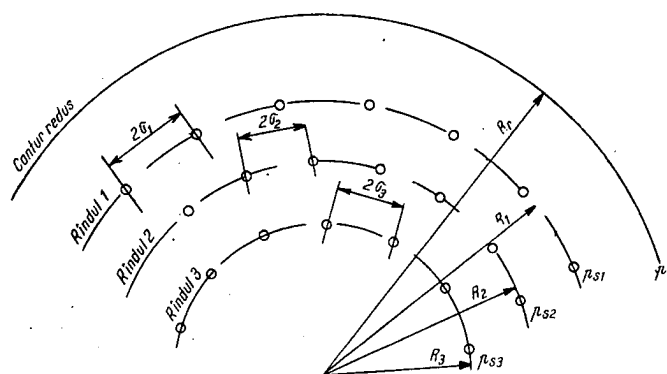


Fig. 46. Determinarea debitului unui zăcămint circular în regim cu împingere de apă producind cu debite-limită.

în care $\frac{\pi R_2}{\sigma_2} = m_2$, numărul sondelor din cel de al doilea rând, acest rând va produce cu debitul Q_2 presiunea de fund a sondelor fiind egală cu presiunea-limită.

În acel caz, debitul total al zăcămintului va fi:

$$\sum Q = \frac{\pi R_1}{\sigma_1} q_{lim} + Q_2 = m_1 q_{lim} + Q_2 \quad (97)$$

Dacă însă, din ecuația (96) reiese că:

$$Q_2 > m_2 q_{lim}$$

în acest caz și sondele celui de al doilea rând vor produce fiecare cu debitul-limită q_{lim} , la o presiune de fund, p_{s2} care este mai mare decât presiunea-limită, p_s .

În acest caz vor produce și sondele din cel de al treilea rând al cărui debit se stabilește în mod asemănător, ca și pentru cel de al doilea rând.

În general, pentru debitul rîndului n , limită, avînd presiunile de fund, p_{s_1} și p_{s_2} , care produce cu presiunea-limită, se obține: mai mari decît presiunea-limită.

$$Q_n = \frac{2\pi kh(p_c - p_s) - q_{lim} \cdot \mu_t \left(m_1 \ln \frac{R_r}{R_1} + m_2 \ln \frac{R_r}{R_2} + \dots + m_{n-1} \ln \frac{R_r}{R_{n-1}} \right)}{\mu_t \left(\frac{\ln \frac{R_{n-1}}{R_n}}{\varphi_{gn}} + \ln \frac{R_r}{R_{n-1}} \right)} \quad (98)$$

în care:

m_1, m_2, \dots, m_{n-1} sînt numerele de sonde din rîndurile 1, 2... $n-1$;

φ_{gn} — factorul de corecție pentru rîndul n , după ecuația (81), sau fig. 42.

— Dacă din ecuația (98) reiese:

$$Q_n < m_n \cdot q_{lim},$$

debitul total al zăcămîntului este:

$$\sum_{i=1}^{i=n} Q_i = q_{lim} \sum_{i=1}^{i=n} m_i + Q_n \quad (99)$$

Dacă distanțele dintre sonde din toate rîndurile sînt egale între ele, adică:

$$2\sigma_1 = 2\sigma_2 = \dots = 2\sigma_n = 2\sigma,$$

ecuația (99) se poate scrie și în forma următoare:

$$\sum_{i=2}^{i=n} Q_i = \frac{\pi}{\sigma} q_{lim} \sum_{i=1}^{i=n-1} R_i + Q_n \quad (100)$$

Debitul zăcămîntului în cea de a doua etapă, adică după ce contactul a ajuns la primul rînd, se calculează în mod analog: Considerîndu-se cel de al doilea rînd drept primul, se determină pentru el conturul redus, cel de al treilea rînd se consideră drept al doilea, etc., după care se repetă aplicarea metodei expuse anterior.

Analog se procedează în etapele următoare.

2) Zăcămînte circulare cu regim de expansiune a zonei de gaze libere. Schema zăcămîntului este reprezentată în fig. 47.

Debitul zăcămîntului în prima etapă de exploatare se stabilește în felul următor:

— cu ajutorul ecuației (82) se calculează debitele sondelor din primele două rînduri, dacă acestea ar produce cu presiune-limită de fund.

— Dacă debitele calculate cu ajutorul ecuației (82) sînt mai mici decît debitul-limită, sondele vor produce cu debitele calculate, la presiunea-limită de fund, și debitul zăcămîntului va fi egal cu suma debitelor celor două rînduri.

— Dacă debitele calculate cu ajutorul ecuației (82) sînt mai mari decît debitul-limită, sondele primelor două rînduri vor produce cu debitul-

Debitele rîndurilor următoare se vor determina conform metodei expuse anterior.

c) Determinarea debitului zăcămîntelor ovale cu debite-limită. Dacă raportul dintre axa mică și axa mare ale zăcămîntului este mai mare decît $2/3$, zăcămîntul este considerat zăcămînt circular pentru calculul debitului aplicîndu-se metodele indicate pentru zăcămîntele circulare.

Dacă însă raportul dintre axa mică și axa mare ale zăcămîntului este mai mic decît $2/3$, zăcămîntul se împarte în două sectoare « mari » și două sectoare « mici », cum se vede în fig. 44.

Se calculează întîi debitul în prima etapă, al unui sector mare, considerîndu-l o parte dintr-un cerc.

Debitul primului rînd, dacă ar produce la presiunea-limită de fund, este în conformitate cu ecuațiile (84) și (94), pentru un regim cu împingere de apă:

$$Q_{1M} = \frac{\psi_M k h \Delta p}{\mu_t \ln \frac{R_r}{R_{1M}}} \varphi_{g1M} \quad (101)$$

în care:

Q_{1M} este debitul primului rînd al unui sector mare;

ψ_M — unghiul la centru, corespunzător sectorului (v. fig. 42);

$\Delta p = p_c - p_s$ — diferența dintre presiunea la contur și presiunea-limită;

R_{rM} — raza conturului redus;

R_{1M} — raza rîndului întîi;

φ_{g1M} — factorul de corecție al primului rînd, după ecuația (81) sau fig. 42.

Dacă din ecuația (101) reiese că:

$$Q_{1M} < \frac{\psi_M R_{1M}}{2\sigma_{1M}} \cdot q_{lim}$$

în care $2\sigma_{1M}$ este distanța dintre sonde, exploatarea primului rînd și totodată a zăcămîntului întreg se va face numai prin primul rînd cu debitul:

$$Q = Q_1 \quad (102)$$

și sondele vor produce cu presiunea-limită de fund.

— Dacă însă din ecuația (70) reiese:

$$Q_{1M} > \frac{\psi_M R_{1M}}{2\sigma_{1M}} q_{lim},$$

Dacă din ecuația (103) reiese:

$$Q_{2M} < \frac{\psi_M R_{2M}}{2\sigma_{2M}} q_{lim},$$

sondele primului rând vor produce cu debitul Q_{1M} în care $2\sigma_{2M}$ este distanța dintre sondele celui

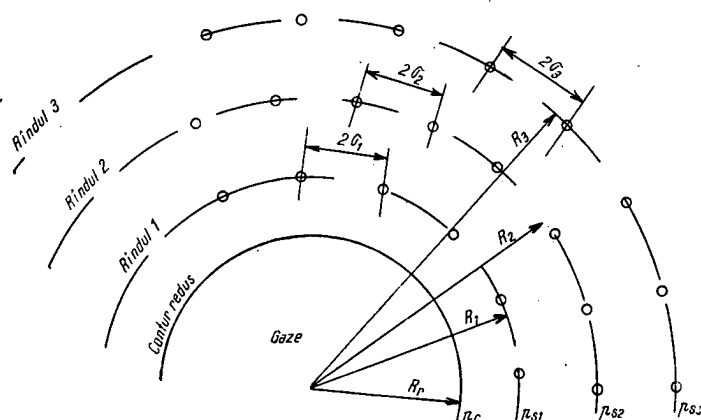


Fig. 47. Schema unui zăcămint circular cu regim de expansiune de gaze libere pentru determinarea debitului cu extracția limitată.

limită, q_{lim} cu o presiune de fund mai mare decât presiunea-limită. În acest caz va produce și cel de al doilea rând. Debitul acestui rând la presiunea-limită de fund, se află în mod similar ca și la zăcămintele circulare. Astfel se obține:

$$Q_{2M} = \frac{\psi_M kh(p_c - p_s) - m_1 q_{lim} \cdot \mu_t \ln \frac{R_{rM}}{R_{1M}}}{\mu_t \left[\frac{\ln(R_{1M}/R_{2M})}{\varphi_{g2M}} + \ln \frac{R_{rM}}{R_{1M}} \right]} \quad (103)$$

în care:

Q_{2M} este debitul celui de al doilea rând;

$m_1 = \frac{\psi_M}{2\sigma_{1M}} \cdot R_1$ — numărul sondelor primului rând;

R_{2M} — raza celui de al doilea rând;

φ_{g2M} — factorul de corecție pentru cel de al doilea rând.

de al doilea rând în acest caz, cel de al doilea rând va produce cu debitul Q_{2M} , la presiunea-limită de fund, și debitul total al unui sector va fi:

$$\sum Q = \frac{\psi_M R_{1M}}{\sigma_{1M}} q_{lim} + Q_{2M} = m_1 q_{lim} + Q_{2M} \quad (104)$$

Dacă însă din ecuația (103) reiese

$$Q_{2M} > m_2 \cdot q_{lim}$$

în care $m_2 = \frac{\psi_M \cdot R_{2M}}{2\sigma_{2M}}$, numărul sondelor

celui de al doilea rând, în acest caz și sondele celui de al doilea rând vor produce cu debitul-limită, cu o presiune mai mare decât presiunea limită. Totodată vor produce și sondele din cel de al treilea rând, al căror debit se stabilește cum s-a menționat anterior.

În general, pentru debitul rîndului n , care produce cu presiunea-limită, se obține:

$$Q_{nM} = \frac{\psi_M kh(p_c - p_s) - q_{lim} \mu_t \left(m_1 \ln \frac{R_{rM}}{R_{1M}} + m_2 \ln \frac{R_{rM}}{R_{2M}} + \dots + m_{n-1} \ln \frac{R_{rM}}{R_{n-1,M}} \right)}{\mu_t \left[\frac{\ln(R_{n-1,M}/R_{nM})}{\varphi_{gnM}} + \ln \frac{R_{rM}}{R_{n-1,M}} \right]} \quad (105)$$

în care:

m_1, m_2, \dots, m_{n-1} , sînt numărul sondelor din rîndul 1, 2 ... $n-1$;
 φ_{gnM} , — factorul de corecție pentru rîndul « n », conform ecuației (81) sau fig. 42.

Dacă din ecuația (105) reiese

$$Q_n < m_n \cdot q_{lim},$$

debitul total al unui sector mare în etapa întâi este:

$$\sum_{i=1}^{i=n} Q_n = q_{lim} \sum_{i=1}^{i=n-1} m_i + Q_n. \quad (106)$$

Dacă $2\sigma_{1M} = 2\sigma_{2M} = \dots = 2\sigma_{nM} = 2\sigma$, ecuația (106) se poate scrie și astfel:

$$\sum_{i=1}^{i=n} Q_i = \frac{\psi_M}{2\sigma_M} q_{lim} \sum_{i=1}^{i=n-1} R_{iM} + Q_{nM}. \quad (107)$$

Debitul unui sector mare în etapa a doua, adică după ce contactul a ajuns la primul rînd, se calculează în mod analog: Considerîndu-se cel de al doilea rînd drept primul, se determină pentru el conturul redus, cel de al doilea rînd se consideră drept al doilea, etc., după care se repetă calculul.

Analog se procedează în etapele următoare. În ce privește debitul sectoarelor mici, întâi se stabilește distanța dintre sondele unui rînd, astfel încît avansarea contactului să se facă în mod uniform. Pentru aceasta se poate deduce ecuația pentru distanța dintre sondele primului rînd al sectorului mic:

$$\sigma_{1m} = \frac{R_{1m} R_{0M}^2 - R_{1M}^2}{R_{1M} R_{0m}^2 - R_{1m}^2} \sigma_{1M} \quad (108)$$

în care:

$2\sigma_{1m}$ — distanța dintre sondele primului rînd al unui sector mic;
 R_{1m}, R_{1M} — raza primului rînd al sectorului mic, respectiv al sectorului mare;
 R_{0m}, R_{0M} — raza contactului sectorului mic, respectiv al sectorului mare;
 $2\sigma_{1M}$ — distanța dintre sondele primului rînd al unui sector mare.

Ecuații analoge cu ecuația (108) se obțin pentru distanțele dintre sondele rîndurilor următoare.

Debitul întregului zăcămint este egal cu debitul total al celor patru sectoare.

11. Determinarea duratei de exploatare a zăcămintelor. a) Metoda determinării. Cum s-a menționat anterior, durata de exploatare a unui zăcămint se împarte în etape, fiecare etapă fiind determinată de timpul de avansare a

contactului între două rînduri consecutive de sonde. Prin urmare, durata totală de exploatare a unui zăcămint este egală cu suma duratelor de exploatare ale tuturor etapelor separate.

Deoarece, la metodele aplicate pentru calculul debitului unui zăcămint se folosește conturul redus, obținîndu-se ca rezultat debitul mediu pe etapa de exploatare, durata de exploatare a etapei i se obține, împărțind fracțiunea din rezerva extractibilă din zăcămint care se află între rîndurile i și $i-1$, prin debitul zăcămintului în această etapă.

b) Determinarea duratei de exploatare a zăcămintelor liniare.

1) Zăcămintele liniare în regim cu împingere de apă sau de expansiune a zonei de gaze libere. Durata de exploatare a primei etape care este egală cu durata de exploatare a primului rînd de sonde, se calculează cu ecuația

$$t_I = \frac{2\sigma L_0 h \cdot m \cdot \varepsilon S_0}{(\Sigma q)_I} \quad (109)$$

în care:

t_I este durata de exploatare, în s;
 2σ — distanța dintre două sonde, în cm;
 L_0 — distanța dintre primul rînd de sonde și contactul inițial, în cm;
 ε — coeficientul de extracție, specific regimului de zăcămint;
 S_0 — saturația inițială cu Țitei a stratului;
 $(\Sigma q)_I$ — debitul zăcămintului pe lățimea 2σ în prima etapă, în cm^3/s .

Dacă zăcămintul se exploatează cu o presiune de fund fixă, debitul zăcămintului se determină cu ecuația (72).

Dacă zăcămintul se exploatează cu un debit-limită al sondelor, debitul zăcămintului se determină cu ecuația (93), după metoda indicată în paragraful respectiv.

Dacă zăcămintul are un singur rînd de sonde, durata lui de exploatare este egală cu t_I .

Dacă zăcămintul are n rînduri de sonde, durata lui totală de exploatare se compune din n etape, dintre care durata celei de a doua etape este:

$$t_{II} = \frac{2\sigma L_2 h \cdot m \cdot \varepsilon S_{0t}}{(\Sigma q)_{II}} \quad (110)$$

în care:

t_{II} este durata celei de a doua etape în s;
 L_2 — distanța dintre cel de al doilea rînd și primul rînd, în cm;
 $(\Sigma q)_{II}$ — debitul zăcămintului în cea de a doua etapă, stabilit analog ca anterior, în prima etapă.

Durata etapei n (ultima etapă) este:

$$t_{(n)} = \frac{2\sigma L_{(n)} h \cdot m \cdot \varepsilon S_{0t}}{(\Sigma q)_{(n)}} \quad (111)$$

în care:

$t_{(n)}$ este durata etapei n , în s;
 $L_{(n)}$ — distanța dintre rîndul n (ultimul rînd) și rîndul $n-1$ (penultimul rînd, în cm;
 $(\Sigma q)_{(n)}$ — debitul zăcămîntului în etapa n , egal cu debitul ultimului rînd, în cm^3/s .

Durata totală de exploatare a unui zăcămînt cu n rînduri este deci:

$$\sum_{i=1}^{i=(n)} t_{(i)} = t_I + t_{II} + \dots + t_{(n)}. \quad (112)$$

Dacă toate rîndurile de sonde se pun în producție simultan, durata totală de exploatare a zăcămîntului întreg este egală cu durata de exploatare a ultimului rînd.

$(\Sigma q)_{(n,1)}$ — debitul rîndului central, q , conform ecuației (76), stabilit pentru etape « (n_1) ».

Dacă presiunile celor două contururi de alimentare sînt egale și dacă distanțele dintre rînduri se aleg egale pentru ambele părți, ecuația (113) se simplifică astfel:

$$t_{(n)} = \frac{4\sigma L_{(n)} h \cdot m \cdot \varepsilon \cdot S_{t_0}}{q_{(n)}} \quad (114)$$

în care:

$q_{(n)}$ este debitul rîndului central, stabilit conform ecuației (77) pentru q ;

$L_{(n)}$ — distanța rîndului central de la un rînd vecin.

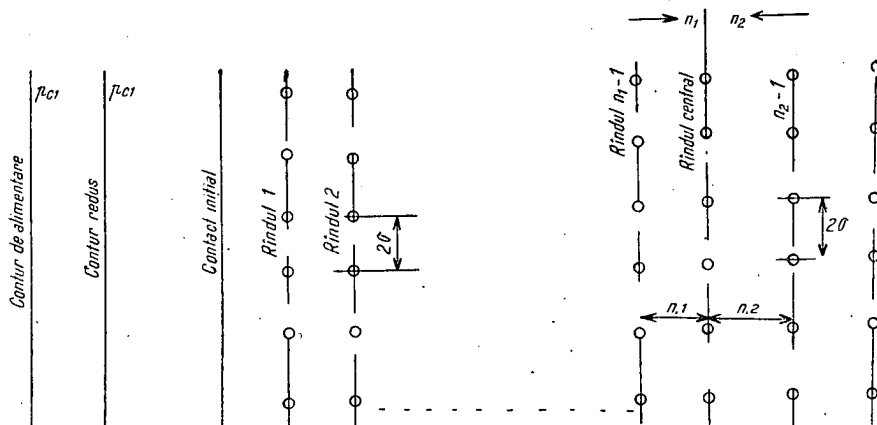


Fig. 48. Schema unui zăcămînt liniar cu două contururi de apă, pentru determinarea duratei de exploatare.

Dacă un zăcămînt liniar are două contururi de alimentare cu apă, astfel cum se vede în fig. 48, el se consideră compus din două părți, separate între ele prin ultimul rînd de sonde, rîndul central, a cărui poziție s-a stabilit astfel, încît contactele de țitei-apă din ambele părți să atingă simultan acest ultim rînd (v. și 4. c)). Durata totală de exploatare a zăcămîntului întreg este egală cu suma etapelor uneia dintre părți cu n_1 rînduri, care se stabilește cum s-a menționat anterior, cu excepția ultimei etape, a cărei durată se stabilește cu ajutorul ecuației:

$$t_{(n,1)} = \frac{2\sigma (L_{(n,1)} + L_{(n,2)}) h \cdot m \cdot \varepsilon \cdot S_{t_0}}{(\Sigma q)_{(n,1)}} \quad (113)$$

în care:

$t_{(n,1)}$ este durata etapei de avansare a contactului de la rîndul $(n_1 - 1)$ pînă la rîndul central (n_1);

$L_{(n,1)}, L_{(n,2)}$ — distanțele rîndului central de la penultimele rînduri ale fiecărei părți;

Durata totală de exploatare a zăcămîntului este:

$$\sum_{i=1}^{i=(n)} t_{(i)} = t_I + t_{II} + \dots + t_{(n,1)}. \quad (115)$$

2) Zăcămînte liniare, în regim cu împingere de apă și de expansiune a zonei de gaze libere. Astfel de zăcămînte se consideră compuse din două părți, separate între ele prin ultimul rînd de sonde, rîndul central, a cărui poziție s-a stabilit astfel, încît contactele din ambele părți să ajungă simultan la rîndul central. Durata totală de exploatare a zăcămîntului este egală cu suma etapelor uneia dintre părți (cu n_1 rînduri), care se stabilește ca și anterior, la zăcămîntele cu un singur contur de alimentare, cu excepția ultimei etape a cărei durată este:

$$t_{(n,1)} = \frac{2\sigma (L_{(n,1)} + L_{(n,2)}) h \cdot m \cdot \varepsilon \cdot S_{t_0}}{(\Sigma q)_{(n,1)}} \quad (116)$$

în care:

$t_{(n,1)}$ este durata de avansarea con-
— tactului de la rîndul
 $n_1 - 1$ pînă la rîndul n_1 ;
 $L_{(n,1)}, L_{(n,2)}$ — distanțele rîndului central
de la penultimele rînduri
ale fiecărei părți (v. fig. 48);
 $(\Sigma q)_{(n,1)}$ — debitul rîndului central n_1
în ultima etapă, stabilit
conform ecuației (78)
pentru q .

Durata totală de exploatare a întregului
zăcămint este:

$$\sum_{i=1}^{i=(n)} t_{(i)} = t_I + t_{II} + \dots + t_{(n)}. \quad (117)$$

Dacă toate rîndurile de sonde se pun în
producție simultan, durata totală de exploată-
tare a zăcămintului întreg este egală cu durata
de exploatare a rîndului central.

c) *Determinarea duratei de exploatare a zăcă-
mintelor circulare.*

1) *Zăcămintele circulare în regim
cu împingere de apă.* Durata de
exploatare a primei etape, care este egală cu
durata de exploatare a primului rînd de sonde,
se calculează cu ajutorul ecuației:

$$t_I = \frac{\pi (R_0^2 - R_1^2) h \cdot m \cdot \varepsilon \cdot S_{t_0}}{(\Sigma Q)_I} \quad (118)$$

în care:

t_I este durata primei etape de exploatare;
 R_0 — raza contactului inițial (v. și fig. 46);
 R_1 — raza primului rînd de sonde;
 $(\Sigma Q)_I$ — debitul zăcămintului în prima

etapă. Dacă zăcămintul produce
cu o presiune de fund fixă, de-
bitul lui se determină cu ecuația
(80). Dacă însă zăcămintul pro-
duce cu un debit-limită al sondelor,
debitul zăcămintului se determină
cu ecuația (100), după metoda
indicată în paragraful respectiv.

Dacă zăcămintul are n rînduri de sonde,
durata lui totală de exploatare se compune
din n etape, dintre care durata celei de a doua
etape este:

$$t_{II} = \frac{\pi (R_1^2 - R_2^2) h \cdot m \cdot \varepsilon \cdot S_{t_0}}{(\Sigma Q)_{II}} \quad (119)$$

în care:

t_{II} este durata de exploatare a celei de a
doua etape;
 R_2 — raza celui de al doilea rînd;
 $(\Sigma Q)_{II}$ — debitul zăcămintului în cea de a
doua etapă stabilit ca anterior.

Durata etape n este:

$$t_{(n)} = \frac{\pi (R_{n-1}^2 - R_n^2) h \cdot m \cdot \varepsilon \cdot S_{t_0}}{(\Sigma Q)_{(n)}} \quad (120)$$

în care:

$t_{(n)}$ este durata etapei n ;
 $R_{(n-1)}, R_n$ — raza penultimului, respectiv a
ultimului rînd de sonde;
 $(\Sigma Q)_{(n)}$ — debitul zăcămintului în etapa
 n , egal cu debitul ultimului rînd.
Durata totală de exploatare a unui zăcămint
circular cu n rînduri de sonde este:

$$\sum_{i=1}^{i=(n)} t_{(i)} = t_I + t_{II} + \dots + t_{(n)}. \quad (121)$$

Dacă toate rîndurile de sonde se pun în
producție simultan, durata de exploatare a
ultimului rînd este egală cu durata totală de
exploatare a zăcămintului.

2) *Zăcămintele circulare cu re-
gim de expansiune a zonei de
gaze libere.* Durata de exploatare a
primei etape, care este egală cu durata de
exploatare a primului rînd de sonde, este:

$$t_I = \frac{\pi (R_1^2 - R_0^2) h \cdot m \cdot \varepsilon \cdot S_{t_0}}{(\Sigma Q)_I} \quad (122)$$

în care:

t_I este durata de exploatare a primei etape;
 R_1 — raza primului rînd de sonde (v.
fig. 47);
 R_0 — raza contactului inițial;
 $(\Sigma Q)_I$ — debitul zăcămintului în prima
etapă.

Dacă zăcămintul produce cu o presiune de
fund fixă, debitul zăcămintului este egal cu
suma debitelor primelor două rînduri, stabilite
cu ecuația (82).

Durata de exploatare a primei etape este:

$$t_I = \frac{\pi (R_1^2 - R_0^2) h \cdot m \cdot \varepsilon \cdot S_{t_0}}{m_1 q_1 + m_2 q_2} \quad (123)$$

în care:

m_1, m_2 — reprezintă numărul de sonde din
primul, respectiv din cel de al do-
ilea rînd;
 q_1, q_2 — debitul unei sonde din primul,
respectiv din cel de al doilea rînd.

Dacă produce numai un singur rînd, debitul
lui, respectiv debitul zăcămintului $(\Sigma Q)_I$, se
stabilește cu ecuația (83).

De asemenea, durata de exploatare a etapei
 i se stabilește cu ecuația:

$$t_{(i)} = \frac{\pi (R_i^2 - R_{i-1}^2) h \cdot m \cdot \varepsilon \cdot S_{t_0}}{m_i \cdot q_i + m_{i+1} \cdot q_{i+1}} \quad (124)$$

în care:

m_i, m_{i+1} — reprezintă numărul de sonde
din rîndul i , respectiv din
rîndul $i + 1$;
 q_i, q_{i+1} — debitul unei sonde din rîndul
 i , respectiv din rîndul $i + 1$;
 R_i, R_{i-1} — raza rîndului de sonde i ,
respectiv $i - 1$, care se sta-
bilește conform ecuației (82).

Durata de exploatare a etape n (a ultimei etape) este egală cu:

$$t_{(n)} = \frac{\pi (R_n^2 - R_{n-1}^2) h \cdot m \cdot \varepsilon \cdot S_{i_0}}{(\Sigma Q)_{(n)}} \quad (125)$$

în care:

$(\Sigma Q)_{(n)}$ este debitul ultimului rînd, care se stabilește conform ecuației (52);

R_n, R_{n-1} — raza ultimului, respectiv a penultimului rînd de sonde.

Durata totală de exploatare a zăcămintului este egală cu:

$$\sum_{i=1}^{i=(n)} t_i = t_I + t_{II} + \dots + t_{(n)} \quad (126)$$

Această ecuație este identică cu ecuația (121).

Dacă zăcămintul produce cu un debit-limită al sondelor, în ecuațiile duratei de exploatare se introduc debitele stabilite conform celor menționate în 10. b).

d) *Determinarea duratei de exploatare a zăcămintelor ovale.* Dacă raportul dintre axa mică și axa mare al zăcămintului este mai mare decît $2/3$, zăcămintul se consideră circular și durata lui de exploatare se stabilește conform celor expuse în 3 b).

Dacă însă raportul dintre axa mică și axa mare este mai mic decît $2/3$, zăcămintul se împarte în sectoare circulare, conform celor arătate la 9. c) și 10 c), calculîndu-se — pentru fiecare sector — debitul și durata de exploatare, ca și în cazul zăcămintelor circulare.

12. Corecțiile calculelor hidrodinamice pentru condițiile reale de exploatare.

a) *Imperfecția sondelor.* Influența imperfecției sondelor, din punctul de vedere al modului de deschidere (provocată de tubarea sondelor cu coloane perforate sau slițuite), asupra debitului sondelor se ia în considerare, aplicînd formulelor pentru debit, un factor de corecție φ_s , a cărui valoare depinde de numărul și de secțiunea orificiilor executate în peretele coloanei (v. cap. II D. f. 2.)

Imperfecția sondelor din punctul de vedere al gradului de deschidere (provocată de străpungerea incompletă a stratului productiv), duce și ea la o micșorare a debitului, care se exprimă printr-un factor de corecție, subunitar, valoarea acestuia fiind în primul rînd în funcție de gradul de deschidere, adică de raportul dintre porțiunea stratului productiv, străbătută de sondă, și grosimea totală a stratului (valori pentru factorul de corecție, v. cap. II D. f. 1).

b) *Asimetria zăcămintului.* Dacă lățimea unui zăcămint liniar variază mult, rîndurile sondelor nu mai sînt paralele între ele. În acest caz, rîndurile se amplasează astfel, încît distanța dintre ele să fie mai mare pe porțiunile mai late ale zăcămintului. Pentru ca totuși înundarea rîndurilor de către agentul motor (apa

sau gazele) să se facă simultan, pe toată lungimea lor, este necesar ca viteza de deplasare a țiteiului să fie mai mare pe porțiunile unde distanța dintre rînduri este mai mare. Acest lucru se obține prin micșorarea corespunzătoare, pe aceste porțiuni, a distanței dintre sonde, 2σ .

Dacă zona de gaze libere a unui zăcămint circular are o poziție excentrică față de conturul exterior sau față de contactul țitei-apă, rîndurile sondelor își mențin forma de cercuri, care sînt însă și ele excentrice unul față de altul. Și în acest caz, viteza de deplasare a țiteiului trebuie să varieze în diferitele porțiuni ale zăcămintului, în raport cu distanța dintre rîndurile de sonde, ceea ce se obține de asemenea variînd distanța dintre sonde.

c) *Variația proprietăților fizice ale stratului productiv.* Dacă variația porozității și a permeabilității stratului productiv nu depășesc anumite limite, în calculul hidrodinamic se introduc valorile medii ale acestor parametri. Dacă însă variația acestor parametri este mare pe diferite porțiuni ale zăcămintului, introducerea valorilor lor medii în calcul nu mai este admisibilă. Pentru aceeași durată de exploatare, distanța dintre sondele unui rînd trebuie fixată cu atît mai mare, cu cît raportul dintre porozitate și permeabilitate este mai mic, ținîndu-se astfel seamă de variația în spațiu a acestor proprietăți ale stratului productiv.

f. Proiectarea operațiilor de menținere a presiunii de zăcămint

1. *Scopul operațiilor de menținere a presiunii de zăcămint.* Dintre cele patru regimuri de bază ale zăcămintelor de țitei, și anume: regimul cu împingere de apă, regimul de expansiune a gazelor, regimul elastic și regimul gravitațional, în decursul exploatării zăcămintelor de țitei, durata regimului elastic de la începutul exploatării este, de obicei, relativ scurtă. În ce privește regimul gravitațional de la sfîrșitul exploatării, durata acestuia este lungă, în schimb însă acest regim asigură un ritm de extracție foarte lent. Deoarece însă regimul de gaze din soluție asigură un coeficient de extracție mic, urmează că, într-o exploatare rațională, cea mai mare parte a țiteiului unui zăcămint trebuie să se extragă, fie în regimul cu împingere de apă, fie în regimul de expansiune a zonei de gaze libere, care asigură un coeficient de extracție mare.

Dintre aceste două regimuri din urmă, regimul cu împingere de apă se caracterizează în primul rînd prin constanța presiunii de zăcămint, datorită fie existenței unui afloriment al zonei de apă, alimentată permanent de la suprafață, fie existenței unei ape de zăcămint închise însă de un volum foarte mare. În ce privește regimul de expansiune naturală a zonei de gaze libere, constanța presiunii de zăcămint nu se realizează, în general, pentru că

în mod normal nu există zăcăminte de țiței cu zonă de gaze libere cu dimensiuni atât de mari.

Pentru a menține presiunea de zăcămintă cât mai constantă, lucru care constituie un element esențial într-o exploatare rațională, se execută operații de menținere a presiunii de zăcămintă injectând în acesta un agent motor, și anume, apă, gaze sau aer. În lumina celor expuse, aceste operații se aplică în următoarele cazuri:

— Când în cursul exploatării în regim elastic, presiunea de zăcămintă a scăzut pînă la presiunea de început de fierbere a țițeiului.

— Când exploatarea se face în regimul de expansiune a zonei de gaze libere și, mai ales, cînd regimul este cel de gaze din soluție.

În sensul strict al « menținerii », la operațiile de menținere a presiunii de zăcămintă, cantitatea de agent motor injectat în unitatea de timp trebuie să fie, în condițiile de zăcămintă, egală cu volumul din zăcămintă al fluidelor extrase în unitatea de timp. Totodată, operația de injectare ar trebui să înceapă înainte ca presiunea de zăcămintă să fie scăzut prea mult sub presiunea de început de fierbere*). În practică, aceste condiții nu sînt totdeauna îndeplinite. În cazul injectării de gaze, cantitatea de gaze extrase, chiar dacă s-ar reinjecta integral, nu este suficientă pentru a menține presiunea constantă, avînd în vedere că, afară de gaze, se mai extrage și țiței și, eventual, apă. În realitate, de cele mai multe ori, gazele nu se reinjectează integral, o parte din ele fiind consumate în schelă drept combustibil. Operațiile de injectare încep uneori cu întîrziere, adică după ce presiunea de zăcămintă a scăzut prea mult sub presiunea de început de fierbere a țițeiului, fie pentru motivul că la începutul exploatării nu se cunoaște încă suficient caracterul zăcămintului, pentru a putea alege metoda cea mai rațională de injectare, fie pentru motivul că nu au fost la dispoziție de la început mijloacele necesare executării operației. Aici este însă de observat că, o mică întîrziere la injectarea gazelor, nu micșorează coeficientul de extracție final, decît într-o măsură relativ mică (v. Cap. VI A.d.2 și C.c.1.c). În cazul injectării întîrziate de apă, receptivitatea sondelor poate fi prea mică, cerîndu-se prea multe sonde de injectie, ceea ce micșorează efectul economic al operației.

În unele cazuri, se injectează în zăcămintă o cantitate de agent motor mai mare decît ar corespunde debitului fluidelor extrase. Acest procedeu se folosește, fie pentru a mări (reface) presiunea de zăcămintă scăzută, fie pentru a mări debitul fluidelor extrase, adică pentru a intensifica ritmul de extracție, menținîndu-se presiunea constantă.

În concluzie, prin executarea operațiilor de menținere a presiunii de zăcămintă, se creează

în acesta un regim cu împingere de apă, sau un regim de expansiune a zonei de gaze libere, respectiv concomitent ambele regimuri, în condiții mai mult sau mai puțin, perfecte, realizîndu-se astfel o exploatare rațională cu un coeficient de extracție mare.

2. Alegerea agentului motor. Agentul motor, apa, se poate injecta în zăcămintă, în zona lui de apă, dacă aceasta există, nefiind însă destul de activă a crea — pe cale naturală — un regim cu împingere de apă. Agentul motor, gazele sau aerul, se pot injecta în zona de gaze a zăcămintului, acolo unde aceasta există. În zăcămintele care se exploatează cu regimul gazelor din soluție, se pot injecta gaze în partea cea mai ridicată a structurii unde se poate forma o zonă secundară de gaze libere, atît din gazele injectate, cît și din gazele care ies din țiței, separîndu-se de acesta sub influența gravitației.

Cînd este cazul să se facă o alegere între apă, pe de o parte, și gaze, respectiv aer, pe de altă parte, se preferă gazele, dacă:

— înclinarea stratului este mare (peste 10°), favorizînd o separație bună între țiței și gaze;

- grosimea stratului este mare;
- permeabilitatea stratului este mare;
- viscozitatea țițeiului este mică;
- stratul conține marne hidratabile.

Apa ca agent motor se recomandă dacă:

- grosimea și permeabilitatea stratului sînt mici;
- viscozitatea țițeiului este mai mare;
- stratul nu conține marne hidratabile;
- presiunea stratului este mare. În acest

caz, la presiunea de injectare, aplicată la suprafață, se adaugă presiunea hidrostatică a coloanei de apă din gaura sondelor de injectie.

De sigur că alegerea agentului motor depinde și de măsura în care acesta este disponibil în schelă, în condiții economice.

Utilizarea aerului ca agent motor, în locul gazelor, comportă o serie de dezavantaje, ca: efecte de oxidare asupra țițeiului și mărirea viscozității lui; devalorizarea gazelor extrase din zăcămintă; pericolul de explozii.

Din aceste motive, în R.P.R., aerul nu se injectează în cadrul operațiilor de menținere a presiunii de zăcămintă. În nici un caz însă nu este permis a injecta gaze și aer în zăcămintă, nici simultan, nici consecutiv, la intervale scurte, din cauza pericolului de explozii.

3. Determinarea cantității agentului motor. În cazul injectării apei se folosește ecuația:

$$\frac{dW_j}{dt} = B_t Q_g + (b_t - r B_t) \frac{dx}{dt} + \frac{dW}{dt} \quad (127)$$

sau

$$\frac{dW_j}{dt} = (G_{cr} - r) B_t \frac{dx}{dt} + b_t \frac{dx}{dt} + \frac{dW}{dt}$$

*) V. și Cap. V. I.a. și Cap. VI, B.a.

în care:

$\frac{dW_j}{dt}$ este volumul apei injectate pe zi, în m^3 în condiții standard;

Q_g — volumul gazelor extrase pe zi, în m^3N ;

$\frac{dx}{dt}$ — volumul țițeiului extras pe zi, în condiții standard, în m^3 ;

G_{cr} — rația de extracție gaze-țiței, în m^3N/m^3 ;

r — rația de soluție a țițeiului, în momentul injectării, în m^3N/m^3 ;

$\frac{dW}{dt}$ — volumul apei extrase pe zi, în condiții standard, în m^3 ;

b_t — coeficientul de volum al țițeiului;

b_a — coeficientul de volum al apei, considerat practic cu egal cu 1,0;

B_t — coeficientul de volum al gazelor.

În cazul injectării gazelor se folosește ecuația:

$$\frac{dQ_j}{dt} = Q_g + \left(\frac{b}{B} - r \right) \frac{dx}{dt} + \frac{dW}{dt} \cdot \frac{b_a}{B_t}$$

sau

$$\frac{dQ_j}{dt} = (G_a - r) \frac{dx}{dt} + \frac{1}{B_t} \left(b_t \frac{dx}{dt} + \frac{dW}{dt} \right) \quad (128)$$

în care:

$\frac{dQ_j}{dt}$ este volumul gazelor injectate pe zi, în m^3N .

Întocmirea ecuațiilor (127) și (128) se bazează pe condiția că în condiții de zăcămint, volumul agentului injectat să fie egal cu volumul în aceleași condiții al fluidelor extrase; cum s-a menționat anterior, această egalitate nu se poate realiza în toate cazurile.

În cazul cînd se injectează simultan apă și gaze, suma cantităților de apă și gaze, injectate pe zi, trebuie să corespundă debitului total al zăcămintului. De multe ori, o parte din rîndurile de sonde productive se supun influenței injectării de apă, a cărei cantitate zilnică se stabilește în funcție de debitul acestor rînduri de sonde, și cantitatea de gaze, injectată zilnic, se stabilește în funcție de debitul sondelor, productive din celelalte rînduri, care vor produce sub influența injectării de gaze.

Debitul de extracție al unui zăcămint se poate mări dacă se injectează o cantitate de agent motor corespunzător mai mare. Dacă însă se menține debitul de extracție, se poate mări în aceste condiții (reface) presiunea de zăcămint. Stabilirea unei relații între cantitatea injectată și mărirea presiunii se poate face cu ajutorul ecuațiilor de bilanț material (v. Cap. V B.a....d).

4. Numărul și gabaritul sondelor de injecție. Numărul sondelor de injecție se determină, împărțind cantitatea totală zilnică de agent motor de injectat, stabilită eventual cu ecuația (127) sau (128), prin cantitatea care urmează a se injecta printr-o singură sondă. a) Sonde de injecție de apă. Pentru debitul de injectare al unei sonde se poate folosi ecuația:

$$q_{ai} = \frac{23,5 \cdot \kappa_a \cdot h \cdot (p_i - p_e)}{\mu_a \log \frac{r_e}{r_s}} \cdot \varphi_s \quad (129)$$

în care:

q_{ai} este debitul de injectare, în $m^3/24 h$;

κ_a — permeabilitatea efectivă a stratului de apă, în mD;

h — grosimea stratului, în m;

p_i — presiunea de injectare (la nivelul stratului), în at;

p_e — presiunea stratului (dinamică), în at;

μ_a — viscozitatea apei, în cP;

r_e — raze de injectare a sondei (corespunzătoare cu raze de drenaj a unei sonde în producție), în orice unități de măsură;

r_s — raza găurii sondei de injecție, în aceleași unități ca și raza de injectare;

φ_s — coeficientul de imperfecție al sondei (v. Cap. II D.f.1. și 2.).

Cum reiese din ecuația (129), cantitatea injectată se poate mări, dacă se mărește p_i , adică presiunea de injectare. Practic însă, se evită depășirea unei presiuni de circa 80 at, la suprafață, respectiv la pompele de injecție. La calculul debitului de injectare se folosește, uneori, și noțiunea de « indicele specific de injectivitate », I_{is} , care este exprimat prin cantitatea de apă care se poate injecta zilnic într-un metru de grosime de strat, la creșterea presiunii de injectare cu 1 at.

$$I_{is} = \frac{23,5 \cdot \kappa_a \cdot \varphi_s}{\mu_a \log \frac{r_e}{r_s}} \quad (130)$$

în care:

I_{is} este indicele specific de injectivitate, în $m^3/(at. zi. m)$

pentru celelalte notații v. ecuația (129).

Valoarea indicelui specific de injectivitate variază în limite foarte largi, în funcție de proprietățile fizice ale stratului. La roci-colecatoare, cu agent de cimentare calcaros, indicele specific de injectivitate poate fi considerabil mărit, prin tratamente (eventual repetate) cu acid clorhidric.

În practica proiectării, debitul real de injectare se determină printr-o probă de injectare

care se execută la o sondă de injecție, săpătură în prealabil. Ecuația (129) se folosește de obicei, numai pentru stabilirea unei cifre de control pentru permeabilitatea efectivă față de apă κ_a , debarăce stabilirea acestei cifre — cu ajutorul unei analize de carotă — dă, de multe ori, rezultate greșite (carote nereprezentative). Odată determinată valoarea reală a permeabilității efective, κ_a se poate calcula indicele specific de injectivitate, din care se poate determina debitul de injecție pentru diferite presiuni de injecție, cu ajutorul ecuației:

$$q_{ai} = I_{is} \cdot h(p_i - p_e) \quad (131)$$

În ce privește gabaritul sondelor de injecție, acestea formează un rând, paralel (respectiv,

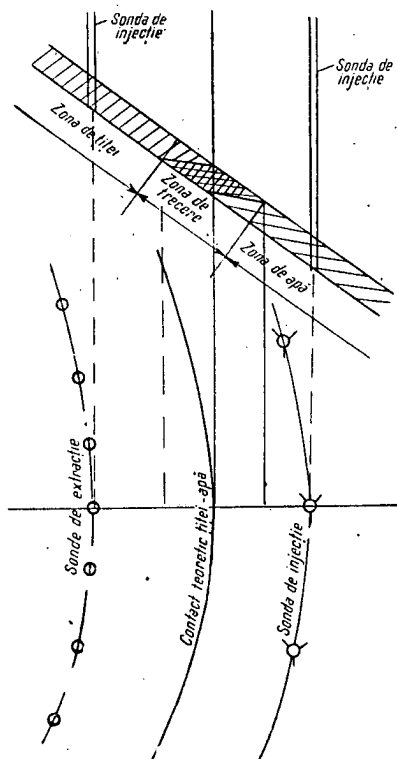


Fig. 49. Amplasarea sondelor de injecție de apă.

concentric) cu rîndurile sondelor de extracție. Sondele de injecție se amplasează extracontural, adică dincolo de conturul (contactul) țitei-apă sau, mai bine zis, dincolo de zona de tranziție (v. Cap. V D.a — d.). Numai în cazul, cînd sondele de injecție sînt amplasate în zona saturată 100% cu apă, permeabilitatea față de apă este maximă, putîndu-se obține și un indice specific de injectivitate, mare (fig. 49).

În zăcămintele întinse de tip platformă, sondele de injecție se amplasează și în rînduri interconturale, în zona de țitei.

La sonde de injecție adînci, apa trebuie tratată pentru a-i asigura stabilitatea necesară, în vederea evitării depunerii în strat a substanțelor din ea (v. Cap. XVIII).

b) Sonde de injecție de gaze. Pentru debitul de injecție al unei sonde se poate folosi ecuația:

$$q_{gi} = \frac{11,75 \cdot \kappa_g h (p_i^2 - p_e^2) \varphi_s}{\mu_g \log \frac{r_e}{r_s}} \quad (132)$$

în care:

q_{gi} este debitul de injecție, în Nm^3/z ;

κ_g — permeabilitatea efectivă a straturilor față de gaze, în Darcy;

μ_g — viscozitatea gazelor, în cP,

celelalte notații ca și la ecuația (129).

Cum reiese din ecuația (132), debitul de injecție crește cu pătratul presiunii de injecție. În practică, presiunea de injecție nu trebuie să depășească presiunea straturilor cu 25%. În mod normal, compresoarele de injecție se construiesc pînă la o presiune de refulare de circa 200 at.

Ecuația (132) se poate scrie și sub forma:

$$q_{gi} = A_i (p_i^2 - p_e^2) \quad (133)$$

în care A_i este aproximativ o constantă care caracterizează receptivitatea sondei. Valoarea acestei constante se determină printr-o probă de injecție, care se execută la o sondă care urmează să servească ulterior ca sondă de injecție.

În ce privește gabaritul sondelor de injecție de gaze, în straturi cu înclinare mai mare, ele se amplasează, ca și la injecția de apă, extracontural, adică dincolo de conturul țitei-gaze, în forma unui rînd. Cînd înclinarea straturilor este foarte mică, sondele de injecție se pot amplasa și intracontural, adică în interiorul zonei de țitei, după un gabarit similar celui de la operațiile de recuperare secundară, însă mai rar decît la acestea. În acest caz însă, regimul de zăcămint, creat prin injecție nu mai este un regim de expansiune a zonei de gaze libere, adică un regim cu împingere externă de gaze, cu contur mobil, ci un regim cu contur fix, care seamănă cu regimul de gaze din soluție și poate fi caracterizat ca un regim întreținut de gaze din soluție. Rația de gaze la acest regim variază ca și la regimul de gaze din soluție (v. fig. 17), atingînd valori mari; în schimb, acest regim întreținut de gaze din soluție asigură un coeficient de extracție mult mai mare decît regimul natural de gaze din soluție.

5. Instalațiile necesare pentru operațiile de menținere a presiunii de zăcămint.

a) Sonde. Forajul sondelor de injecție noi se deosebește de forajul sondelor de extracție,

prin aceea că la primele se impune carotarea mecanică a stratului în care urmează să se facă injectarea. O atenție deosebită cere tratarea noroiului de foraj care trebuie să aibă o filtrație cât mai mică posibilă și care nu trebuie să depună o crustă pe suprafața găurii sondei. Când se proiectează injectarea de gaze, se folosește uneori un noroi negru, care trebuie să aibă o densitate mică, în cazul când presiunea stratului este redusă. Înainte de tubarea ultimei coloane, se execută o operație de tratare chimică a stratului, în special când agentul motor urmează a fi apa. La straturi formate din gresie se recomandă, uneori, o operație de torpilare, în vederea măririi permeabilității. Perforarea cu pușca a coloanei în dreptul stratului prezintă o serie de dezavantaje, deci este preferabil a introduce coloana perforată sau șliuită de afară. Înainte de începerea injectării de apă propriu-zise, se drenează stratul prin pistonare, prin pompă sau prin erupție artificială.

În loc de sonde de injecție noi se pot folosi și sonde vechi. Pentru injectare de apă se pot folosi sonde care au fost forate în zona de apă, și pentru injectare de gaze, sonde forate în zona de gaze sau sonde de la partea cea mai ridicată a structurii, care au rația de gaze foarte mare. De obicei, astfel de sonde trebuie recondiționate, într-o măsură mai mare sau mai mică, înainte de începerea injectării.

Dacă agentul motor se injectează sub presiune mare, sondele se echipează în mod obligatoriu cu țevi de extracție, pentru a proteja coloana. În orice caz, pe cât este posibil se introduc țevi de extracție, ele permițând o serie de intervenții care se execută la sondele de injecție, ca: spălări, curățiri, drenaje, etc.

Când stratul în care se face injectarea este gros, sau când cuprinde pachete de nisipuri cu caracteristice distincte injectarea se face separat pe fracțiunile corespunzătoare ale stratului. Printr-o singură sondă nu se poate injecta, separat, decât în două sau maximum în trei porțiuni ale stratului, separarea făcându-se prin unul, respectiv pe două packere folosind unul, respectiv două rînduri de țevi de extracție. Este însă de observat că folosirea a două packere și a două rînduri de țevi de extracție prezintă dificultăți destul de serioase, de ordin tehnic. De aceea, se evită aplicarea acestei din urmă soluții.

În instalația sondelor de injecție mai intră capul de injecție care se montează la gura puțului, cu cîte o legătură la țevile de extracție și la coloană. Tot la gura puțului se măsoară, de obicei cu un debitmetru, cantitatea agentului motor injectat (v. Cap. XVIII).

b) *Instalații pentru injectarea apei.*

1) *Alimentarea cu apă.* În sistemul alimentării cu apă intră:

- instalațiile de captare (puțuri, bazine, rîuri);
- pompele de apă, cu motoarele lor;

- clădirea stației de pompe;
- conducta de apă la stația de injectare și tratare.

Pentru cantități mici de apă se folosește sistemul de alimentare al schelei respective.

2) *Tratarea apei.* În sistemul de tratare intră:

- rezervoarele pentru apa brută;
- bazinele de sedimentare;
- instalațiile de tratare chimică;
- filtrele mecanice;
- instalația de sterilizare;
- pompele de circulație;
- rezervoarele pentru apa tratată;
- laboratorul;
- clădirile.

Amplasarea sistemului de tratare depinde de gradul pînă la care trebuie tratată apa.

3) *Injectarea apei.* În sistemul de injectare intră:

- pompele, cu motoarele lor pentru injectare;
- sistemul conductelor de injecție;
- claviatura de distribuire a apei;
- aparatele de măsură;
- clădirea stației de pompe.

De obicei, instalația pentru tratarea apei se montează lângă instalația pentru injectarea apei, și toate pompele, atît cele de circulație, cît și cele de injecție, se montează în aceeași clădire.

c) *Instalații pentru injectarea gazelor.*

1) *Alimentarea cu gaze.* Pentru a face economie de energie pentru comprimarea gazelor de injectat se construiesc, pe unde este posibil, două sau chiar trei conducte de alimentare a compresoarelor, după presiunea de colectare. De un folos deosebit sînt conductele, legate de separatoarele de mare presiune ale schelei.

d) *Injectarea gazelor.* În sistemul de injectare intră:

- compresoarele, cu motoarele lor pentru injecție;
- sistemul conductelor de injecție;
- claviatura de distribuire a gazelor;
- aparatele de măsură;
- clădirea stației de compresoare și instalațiile auxiliare (pentru răcire, aparate electrice, filtru, ulei etc.).

6. *Calculule.*

a) *Calcululele hidrodinamice.* Calcululele hidrodinamice, privind debitul și durata de exploatare a zăcămintului, se face conform celor expuse la e.

La injectarea de apă, se ia drept contur de alimentare linia formată de rîndul sondelor de injecție, iar la injectarea gazelor în zona de gaze libere, conturul de alimentare îl formează contactul țitei-gaze.

De multe ori se stabilește, respectiv se cere dinainte un anumit debit de extracție pentru zăcămint. În aceste cazuri se poate verifica, prin calcul, presiunea de injectare și poziția conturului redus; debitul de injectare a agen-

tului motor se ia, de obicei, egal cu debitul de extracție.

b) *Calculul instalațiilor.* Proiectul de exploatare trebuie să indice și dimensiunile principale ale instalațiilor necesare operațiilor de menținere a presiunii de zăcămint, și anume:

— pentru conductele principale: schema de plan, diametrul și eventual grosimea pereților;

— pentru stații de compresoare și pompe: tipul agregatelor, puterea instalată, eventual dimensiunile principale ale cilindrilor;

— dimensiunile principale ale părților instalației pentru tratat apa.

c) *Calculul de rentabilitate.* Dacă o operație de menținere a presiunii se proiectează într-un timp când zăcămintul se află într-un stadiu avansat de epuizare, se impune executarea unui calcul economic, privind rentabilitatea injectării. Acest calcul cuprinde următoarele elemente:

1) *Stabilirea producției viitoare a zăcămintului*, fără executarea operației. Dacă declinul de producție al zăcămintului a ajuns la o valoare constantă, care se cunoaște, producția viitoare se poate calcula cu ajutorul ecuației (23). O a doua metodă constă în calculul producției totale recuperabile, înmulțind rezerva zăcămintului N_0 — stabilită cu ajutorul ecuației (1) — cu coeficientul de extracție caracteristic regimului în care produce zăcămintul, fără operație de menținere, extrasă pînă în momentul începerii injectării; din acest produs se scade cantitatea de țiței extrasă și diferența reprezintă producția viitoare a zăcămintului, fără injectare.

2) *Stabilirea producției viitoare a zăcămintului*, cu executarea operației. Se procedează după a doua metodă, indicată la 1), introducînd însă, în calcul, un coeficient de extracție mai mare, caracteristic regimului nou de exploatare, creat în zăcămint prin operația de injectare.

3) Se stabilește diferența dintre producția viitoare cu sau fără injectare, iar valoarea economică a acestei diferențe trebuie să fie cel puțin egală cu suma amortizării instalațiilor investite, plus cheltuielile lor de exploatare, respectiv de comprimare și tratare a agentului motor.

g. Bazele economice ale exploatării zăcămintelor de țiței

1. *Rolul factorului economic în exploatarea zăcămintelor.* Din studiul hidrodinamicii exploatării zăcămintelor se pot trage următoarele concluzii:

— Cantitatea totală de țiței, care se poate extrage dintr-un zăcămint, nu depinde de numărul sondelor de extracție, în condițiile regimului cu împingere de apă și de expansiune a zonei de gaze libere.

— Generalizînd semnificația ecuației (72):

$$\dot{q} = \frac{2\sigma h k \Delta p}{\mu_t \cdot L_r} \varphi_g$$

respectiv a ecuației (80):

$$Q_r = \frac{2\pi k h \Delta p}{\mu_t \ln \frac{R_{ri}}{R_i}} \varphi_g$$

și analizînd curbele din fig. 37 și 42 rezultă că, paralel cu micșorarea distanțelor dintre sonde, 2σ , respectiv paralel cu mărirea numărului de sonde, debitul fiecărei sonde se micșorează. În consecință, debitul total al zăcămintului nu se mărește proporțional cu mărirea numărului de sonde, ci într-un ritm mai lent, apropiindu-se asimptotic de o valoare-limită, cum se vede în fig. 1, respectiv fig. 4.

Din cele ce preced rezultă că, hidrodinamica, în vederea extracției unei anumite cantități totale de țiței dintr-un zăcămint, nu prescrie un număr anumit de sonde necesare. Rolul de a determina mai precis numărul de sonde îi revine factorului economic, deoarece în funcție de numărul de sonde și de sistemul lor de amplasare, variază debitul zăcămintului, respectiv durata lui de exploatare, de care depinde valoarea:

- productivității muncii;
- eficacității investițiilor;
- prețului de cost al țițeiului extras.

Prin urmare, la proiectarea exploatării unui zăcămint, este necesar să se stabilească — în primul rînd — acești indici economici.

2. Productivitatea muncii.

a) *Noțiunea și elementele componente.* Prin productivitatea muncii înțelegîndu-se raportul dintre producția obținută și munca prestată pentru ea, ca unități de măsură se folosesc:

- pentru producție, m^3 de țiței;
- pentru cantitatea de muncă, cea prestată de un om într-un an, omul \times an.

În urma unui studiu efectuat într-un mare număr de șantiere din U.R.S.S., munca necesară pentru obținerea unei anumite cantități de țiței se compune din următoarele elemente:

- munca depusă de muncitorii direcți la sondele în producție;
- munca depusă de muncitorii auxiliari, la sondele în producție;
- munca depusă de personalul tehnico-administrativ, la sondele în producție;
- munca depusă pentru forajul sondelor.

Împărțind producția obținută, prin valoarea muncii depuse de muncitorii menționați se obține productivitatea muncii în m^3 de țiței pe om \times an.

b) *Munca depusă de muncitorii direcți, la sondele în producție.* Prin muncitorii direcți se înțeleg, în primul rînd muncitorii ocupați cu întreținerea directă a procesului de extracție la o anumită sondă sau la un număr restrîns de sonde, care formează o unitate topografică.

Deoarece întreținerea sondelor în producție se compune din operații care se execută periodic și cu o oarecare uniformitate la toate sondele, o mare parte din timpul de lucru al muncitorilor direcți este absorbită pentru parcurgerea distanțelor dintre sondele deservite. Adâncimea sondelor și sistemul de extracție au un rol minor, în ce privește cantitatea de muncă depusă de muncitorii direcți, adică de sonderii și de sonderii-șefii de întreținere, la care se mai adaugă muncitorii de la brigăzile de intervenții, a căror muncă constituie numai 15–20% din munca necesară pentru întreținerea procesului de extracție la sonde. Constatările precedente au rezultat din studiile întreprinse în șantierele din U.R.S.S., stabilindu-se o relație analitică între numărul de muncitori direcți, necesari pentru o sondă, M_d , și suprafața atribuită unei sonde F_s , care este în funcție de distanța dintre sondele șantierului respectiv de densitatea sondelor.

Această relație are forma:

$$M_d = 0,8 F_s^{0,77} + 0,5 \quad (134)$$

M_d este numărul de muncitori direcți, necesari unei sonde;

F_s — suprafața atribuită unei sonde medii pe șantier, în ha.

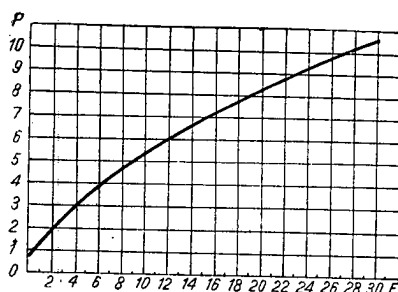


Fig. 50. Relația dintre numărul de muncitori direcți necesari pentru o sondă în producție, M_d și suprafața care revine unei sonde F_s .

Reprezentarea grafică a ecuației (134) este dată în fig. 50.

Cantitatea totală de muncă în oameni \times ani depusă de muncitorii direcți la exploatarea unui zăcămint, se află înmulțind valoarea M_d , corespunzătoare suprafeței medii a unei sonde (din fig. 50 sau din ecuația (134)), cu numărul de sonde \times ani de exploatare. Dacă în diferitele etape de exploatare a zăcămintului, valoarea F_s variază, se vor introduce pentru M_d în fiecare etapă valorile corespunzătoare pentru F_s diferite între ele.

În ce privește valorile lui M_d , pentru industria de petrol din R.P.R. și celelalte valori necesare calculului indicilor tehnico-

economici, care se expun în cele ce urmează, v. subcapitolul g. 5.

c) *Munca depusă de muncitorii auxiliari, la sondele în producție.* Prin muncitori auxiliari se înțeleg muncitorii concentrați în unități aparte care deservește tot ansamblul de sonde în producție al unui șantier, muncitorii de la atelierele mecanice de la stațiile centrale de pompare, de la transporturi etc. Numărul total al acestor muncitori se mărește paralel cu numărul total al sondelor șantierului, dar nu proporțional, ci într-o măsură mai mică, din motive de ordin organizatoric. În consecință, numărul de muncitori auxiliari necesari pentru o sondă în producție se va micșora, pe măsură ce numărul total al sondelor șantierului se va mări. Din studiile efectuate în U.R.S.S. menționate anterior, a rezultat relația următoare:

$$M_a = \frac{17}{(\Sigma n)^{0,8}} \quad (135)$$

în care:

M_a este numărul de muncitori auxiliari, necesari pentru o sondă în producție;

(Σn) — numărul total de sonde în producție ale șantierului.

Reprezentarea grafică a ecuației (135) este dată în fig. 51.

Cantitatea totală de muncă în oameni \times ani depusă de muncitorii auxiliari la exploatarea unui zăcămint, se află înmulțind valoarea M_a , corespunzătoare numărului total de sonde în producție (din fig. 51 sau din ecuația (135)), cu numărul de sonde \times ani de exploatare. Când numărul total de sonde în producție variază de la o etapă de exploatare la alta și valoarea lui M_a va varia de la o etapă la alta.

d) *Munca depusă de salariații tehnico-administrativi la sondele în producție.* În această categorie de salariați intră personalul tehnic de conducere, tehnicienii și inginerii, cum și toți salariații administrativi ai șantierului. Ca și pentru muncitorii auxiliari, s-a găsit relația:

$$M_t = \frac{23}{(\Sigma n)^{0,8}} \quad (136)$$

în care:

M_t este numărul de salariați tehnico-administrativi, necesari pentru o sondă în producție;

(Σn) — numărul total de sonde în producție ale șantierului.

Reprezentarea grafică a ecuației (136) este dată în fig. 52.

Cantitatea totală de muncă depusă de salariații tehnico-economici la exploatarea unui zăcămint, se află ca și pentru muncitorii auxiliari.

e) *Munca depusă pentru forajul sondelor.* Studiile efectuate în șantierele din U.R.S.S. au dovedit că numărul de muncitori direcți

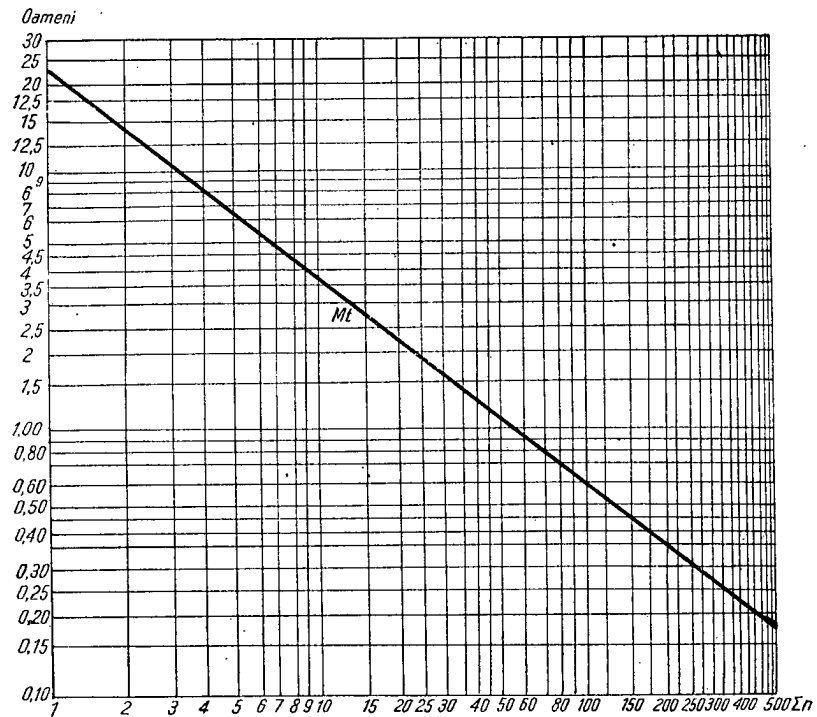


Fig. 51. Relația dintre numărul de muncitori auxiliari M_a , necesari pentru o sondă în producție și numărul total Σn , de sonde ale șantierului.

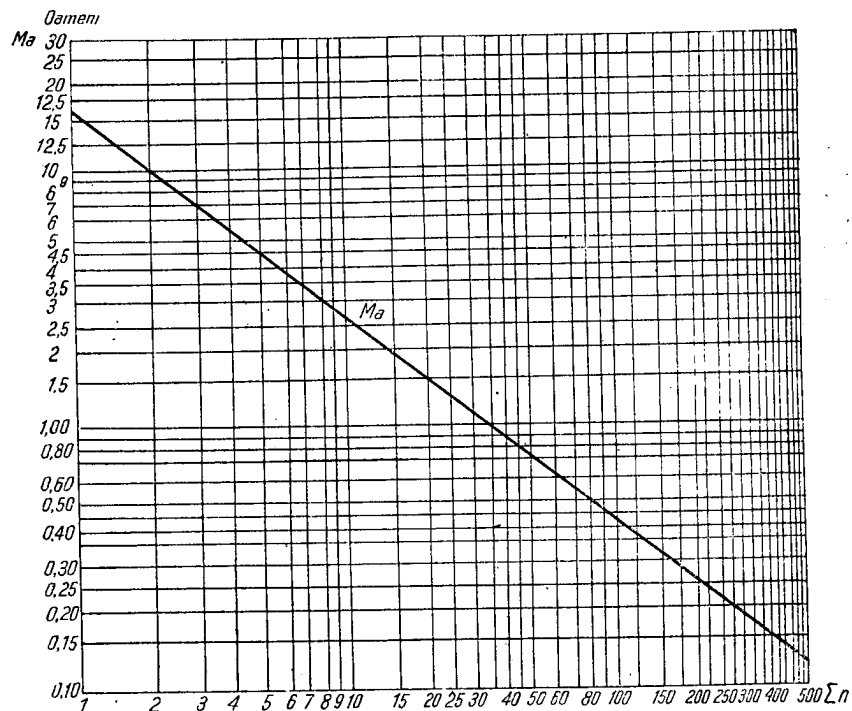


Fig. 52. Relația dintre numărul de salariați tehnico-administrativi M_t , necesari pentru o sondă în producție și numărul total Σn , de sonde ale șantierului.

cum și numărul total de salariați necesari pentru un trolu de foraj sînt în funcție de numărul de trolu în lucru la oficiul de foraj respectiv, și anume, numărul muncitorilor, respectiv de salariați pe granic se micșorează paralel cu mărirea numărului de trolu în lucru, al oficiului de foraj. Rezultatele studiilor precedente sînt concretizate în fig. 53 și 54.

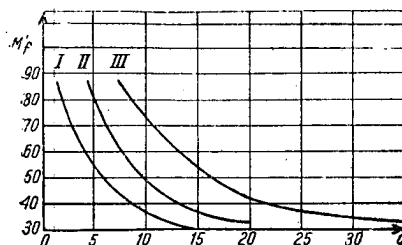


Fig. 53. Numărul de muncitori direcți M_f , necesari pentru un granic de foraj, în funcție de numărul total al granicelor în lucru, g. I, II, III: regiunile I, respectiv II, respectiv III.

În fig. 53 se indică numărul de muncitori direcți M_f , necesari pentru un granic și în fig. 54, numărul total de salariați, M_f , necesari pentru un granic, ambii parametri în funcție de numărul de granice, g. Este însă de observat

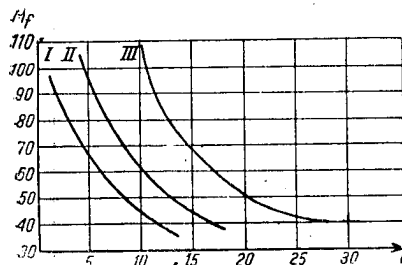


Fig. 54. Numărul total de salariați M_f , necesari pentru un granic de foraj, în funcție de numărul total al granicelor în lucru, g. I, II, III: regiunile I, respectiv II, respectiv III.

că, în timp ce pentru numărul de salariați la sondele în producție pentru fiecare categorie de salariați, respectiv pentru totalul salariaților există câte o singură curbă, la forajul sondelor, numărul de salariați al uneia și aceeași categorie variază de la o regiune la alta. În fig. 53 și 54 sînt reprezentate cîte trei curbe, pentru trei grupe de regiuni diferite. Variația lui M_f și M_f de la o regiune la alta (și la același număr de granice) depinde nu numai de caracterul formațiilor și de adîncimea sondelor, ci și de alți factori ca de exemplu: complexitatea organizației oficiului de foraj, poziția geografică și climaterică a regiunii, etc. Așa dar, curbele din fig. 53 și 54 dau valori pur orientative. La proiectarea exploatării zăcămintelor curbele

reale trebuie stabilite pentru fiecare șantier separat.

Dacă un granic forează l sonde pe an, cantitatea de muncă necesară pentru forajul unei sonde este:

$$\frac{M_f}{l}, \text{ oameni} \times \text{ani}$$

și cantitatea totală de muncă, necesară pentru forajul tuturor sondelor este:

$$\frac{M_f}{l} \cdot \sum n \text{ oameni} \times \text{ani}$$

în care:

$\sum n$ este numărul total de sonde forate.

3. Eficacitatea investițiilor. Totalul investițiilor se compune din cele trei categorii de investiții menționate în cele ce urmează:

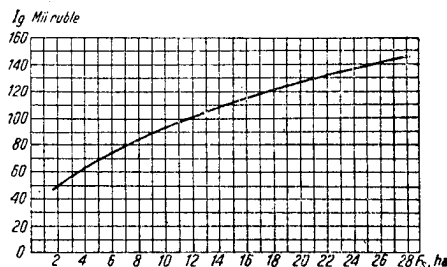


Fig. 55. Relația dintre investițiile generale, necesare pe sonda de producție, I_g și suprafața care revine unei sonde F_s .

a) Investițiile generale. Acestea se compun din investițiile care deservesc ansamblul șantierului și anume: instalațiile pentru colectarea și pomparea țițeiului și a gazelor, atelierele mecanice, instalațiile energetice, mijloacele de transport și comunicații (inclusiv drumurile), troluile mobile de intervenție, clădirile, etc.

La studiile întreprinse în U.R.S.S., pentru stabilirea cuantumului investițiilor generale, s-a folosit o « machetă », care reprezintă o porțiune a șantierului, cuprinzînd un grup de sonde cu instalațiile aferente de colectare, mijloacele de comunicație, clădirile etc.

Astfel s-a găsit o relație între suma necesară pentru investiții și sonda de producție, în funcție de suprafața care revine unei sonde, de producție, în funcție de suprafața care revine unei sonde. Această repartitie este reprezentată în fig. 55.

b) Mijloacele de bază pentru extracție. În această categorie de investiții intră utilajul subteran și de suprafață al sondelor, ca: țevi de extracție, prăjini de pompare, pompe de extracție, capete de erupție, unități de pompare, compresoare de gaze, trolu fixe de intervenție, etc.

c) *Forajul sondelor.* Costul forajului propriu zis al sondelor depinde, în primul rând, de adâncime, de caracterul formațiilor geologice, de caracterul stratului petrolifer și de situația geografică a șantierului. Cheltuielile necesare forajului sondelor sînt calculate în devizele tip în care se ține seamă de toți factorii indicați anterior.

Dacă șantierul de foraj mai cuprinde și instalații cu caracter general ca: ateliere mecanice, magazii, instalații pentru tratat noroiul, conducte magistrale pentru apă și noroi, etc., această parte a investițiilor se poate stabili cu ajutorul unei machete reprezentative.

d) *Investițiile de metal.* În cazul proiectării exploatării zăcămintelor, prin metal se înțelege materialul tubular necesar exploatării, ca: țevi de conducte, burlane de tubaj și prăjini de forat, la care se mai adaugă prăjini de pompare, acolo unde este cazul.

Fabricarea acestor materiale formează o ramură specială de activitate a industriei

sau în t) prin suma investițiilor. Analog se poate stabili:

— eficacitatea globală a metalului investit, împărțind țiteiul total extras prin consumul de metal;

— eficacitatea medie anuală a metalului investit, împărțind producția medie anuală de țitei, prin consumul de metal.

Totalul investițiilor, respectiv totalul metalului consumat, se obține înmulțind consumul pe sondă (v. și fig. 55 și 56) cu numărul sondelor de extracție.

Dacă în cazul exploatării intră și operații de menținere a presiunii de zăcămint, se va ține seama și de investițiile pentru forajul sondelor de injecție și pentru instalațiile de injecție.

4. *Prețul de cost.* Acest indice, unul dintre cei mai importanți indici economici, se obține împărțind cheltuielile totale de exploatare prin cantitatea de țitei extrasă.

Dintre cheltuielile totale de exploatare se stabilesc întâi cheltuielile de întreținere care se compun în primul rând din: salariile personalului ocupat la extracție și cheltuielile pentru materialele mici și pentru energie; la acestea se adaugă cheltuielile generale, cuprinzînd regia generală, transporturile, atelierele etc.

Cheltuielile de întreținere depind, pe de o parte, de numărul sondelor șantierului și, pe de altă parte, de densitatea sondelor, respectiv de suprafața care revine unei sonde. Relația găsită ca rezultat al studiilor întreprinse în șantierele petrolifere din U.R.S.S. are forma următoare:

$$E = -44 \lg(\sum n) + 116 F_s^{0.13} \quad (137)$$

în care:

E reprezintă cheltuielile anuale de întreținere pe sondă, în mii ruble,
 $\sum n$ — numărul sondelor șantierului;
 F_s — suprafața care revine unei sonde, în ha.

Reprezentarea grafică a ecuației (137) este dată în fig. 57, în care curba 1 dă valorile pentru $(-44 \lg \sum n)$ și curba 2 valorile pentru $(116 F_s^{0.13})$.

Deoarece numărul sondelor șantierului și uneori și suprafața care revine unei sonde, variază în diferitele etape de exploatare a unui zăcămint, cheltuielile de întreținere trebuie calculate separat, pe etape și apoi adunate. Cheltuielile totale de exploatare se obțin, adăugîndu-se la cheltuielile de întreținere, amortizarea investițiilor.

La stabilirea cheltuielilor totale de exploatare pentru o fracțiune din durata de exploatare a unui zăcămint, se formează suma între cheltuielile de întreținere și amortizările fracțiunii de durată respective. Se înțelege că sondele care în decursul acestei fracțiuni de timp au ieșit din producție, trebuie amortizate complet.

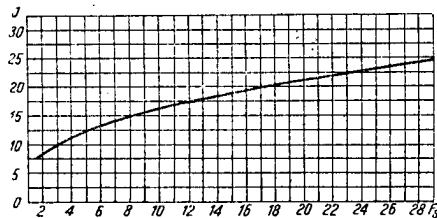


Fig. 56. Relația dintre consumul de metal, I_m , pentru instalațiile de suprafață ale unei sonde de producție și suprafața care revine unei sonde, F_s .

metalurgice și poate constitui o «gîtitură» în aprovizionarea cu materiale a industriei de petrol, dacă nu se întocmește în prealabil un plan precis al consumului strict necesar de «metal».

În ce privește consumul de prăjini de foraj și de burlane de tubaj, pentru calculul acestora există indici de consum, respectiv scheme de tubaj tip, stabilite în prealabil pentru fiecare șantier, respectiv structură sau zăcămint.

Între consumul mediu de metal necesar instalațiilor de suprafață (conductelor) unei sonde de extracție și suprafața care revine unei sonde, s-a găsit o relație a cărei reprezentare grafică este dată în fig. 56.

e) *Calculul eficacității investițiilor.* Împărțind cantitatea de țitei extras prin totalul investițiilor se obține o cifră care reprezintă eficacitatea globală a investițiilor. Această cifră însă nu caracterizează complet economia investițiilor, pentru că nu ține seama de timp, respectiv de durata de amortizare a investițiilor. Deci, pentru caracterizarea economică a investițiilor, se folosește mai bine un indice care dă eficacitatea medie anuală a investițiilor, împărțind producția medie anuală (în m^3

5. Valorile indicilor tehnico-economici pentru industria de petrol din R.P.R. În cursul anului 1952 s-au făcut în industria de petrol din R.P.R. o serie de studii, în mai multe șantiere, pentru stabilirea indicilor economici a exploatării zăcămintelor, ajungându-se la următoarele rezultate:

a) Productivitatea muncii.

1) Munca depusă de muncitorii direcți la sondele în producție, ca și în șantierele sovietice, s-a constatat existența unei relații între numărul de muncitori direcți, necesari unei sonde în producție și suprafața care revine unei sonde. Caracterul curbei $M_d = f(F_s)$ este asemănător celui din fig. 50.

2) Munca depusă de muncitorii auxiliari și de salariații tehnico-administrativi, la sondele în producție. Ca și în șantierele sovietice, s-a găsit atât între muncitorii auxiliari, cât și între salariații tehnico-administrativi pe de o parte și numărul de sonde ale șantierului, pe de altă parte, câte o relație, $M_a = f(\sum n)$ și $M_t = f(\sum n)$, care reprezintă grafic formează curbe asemănătoare celor din fig. 51 și 52.

3) Munca depusă pentru forajul sondelor. În forma unor grafice s-a stabilit relația între numărul de muncitori direcți, respectiv total muncitori, și numărul de grădine în lucru pentru două grupe de șantiere și anume: o grupă de șantiere de exploatare și o grupă de șantiere de explorare. Relațiile stabilite $M_f = f(g)$ sunt similare celor reprezentate în fig. 53 și 54.

b) Investițiile. Pentru investițiile generale și cele de metal necesar instalațiilor de suprafață se iau în mod pur orientativ, cifrele din fig. 55, respectiv 56, transformând sumele exprimate în ruble în sume de lei, la cursul stabilit.

c) Cheltuielile de exploatare. În formă grafică s-au stabilit relații între cheltuielile anuale de întreținere pe sondă și numărul sondelor șantierului, trasându-se trei curbe și anume, câte o curbă care reprezintă funcția:

$$E = f(n)$$

pentru 2,5 respectiv 3,5, respectiv 5,5 ha de suprafață, revenind unei sonde în producție.

6. Domeniul de valabilitate al indicilor tehnico-economici. Indicii tehnico-economici, așa cum au fost stabiliți conform celor expuse, nu reprezintă valori fixe și precise.

În primul rând acești indici variază cu timpul, în sensul că ridicarea nivelului cultural

și de mijloace de producție al colectivității duce la mărirea productivității muncii și a eficacității investițiilor, respectiv la micșorarea prețului de cost.

Valorile indicilor menționate anterior pentru

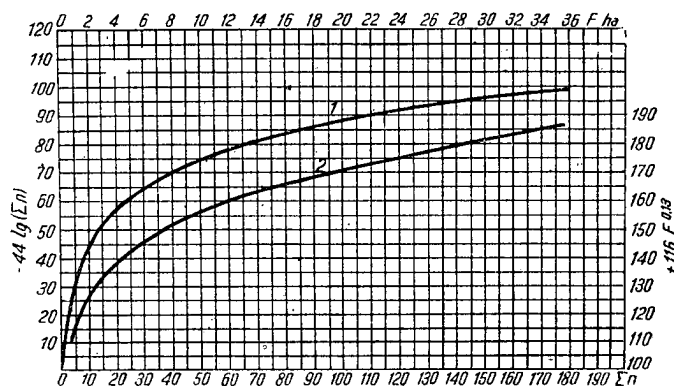


Fig. 57. Componentele cheltuielilor anuale de întreținere, E, pe sondă productivă, în funcție de numărul de sonde ale șantierului, Σn , și de suprafața care revine unei sonde, F_s . (v. ccauția 137.)

industria de petrol sovietică sînt rezultatul unui studiu care cuprinde mai mult decît 100 șantiere de extracție și mai mult de 30 de oficii de foraj. Aceste valori sînt deci valori medii, și între valorile reale ale fiecărui șantier în parte sînt diferențe destul de mari. Aceeași este situația în industria de petrol din R.P.R., unde pentru stabilirea indicilor s-au analizat numai nouă șantiere de extracție și nouă oficii de foraj. Se impune deci o aprofundare a cercetărilor referitoare indicilor tehnico-economici ai exploatării zăcămintelor în următoarele direcții:

- stabilirea influenței caracterului tehnico-geologic asupra valorii indicilor;
- folosirea cît mai completă a normelor tehnice de lucru, pentru operațiile din cadrul forajului sondelor și al extracției țițeiului;
- verificarea preciziei indicilor introduși în proiectele de exploatare a zăcămintelor, prin recalculare pe baza datelor reale obținute în cursul exploatării.

Se înțelege că indicii economici ai diferitelor zăcămintes sau ai diferitelor lor variante de exploatare sînt comparabili între ei numai dacă se presupune că în toate cazurile există aceleași condiții de bază, ca: nivelul tehnic al operațiilor, calificarea personalului, complexitatea organizației muncii etc.

h. Proiectarea complexă a exploatării zăcămintelor de țiței

1. Principiile generale ale proiectării complexe a exploatării unui zăcămint de țiței. Elaborarea proiectului propriu-zis este precedată de executarea unui studiu cuprin-

zind caracterul geologic, fizic și productiv al zăcămintului (v. Capitolul VII B. d.).

Indicii economici ai exploatării unui zăcămint dat depind de numărul și de forma de amplasare a sondelor și această dependență nu este uniformă pentru toți indicii, în sensul că valorile lor optime nu se obțin la același număr de sonde, respectiv la aceeași formă de amplasare a lor. De aici rezultă uneori că, în timp ce, la o variație a numărului de sonde un indice se îmbunătățește, alt indice se înrăutățește.

Din aceste considerente reiese obiectivul principal al proiectării complexe a exploatării unui zăcămint de țiței și anume: analiza mai multor variante de exploatare, în ce privește numărul și forma de amplasare a sondelor, stabilind pentru fiecare variantă:

- debitul de extracție și durata de exploatare, cu ajutorul calculelor hidrodinamice;
- indicii economici, cu ajutorul calculelor economice;

- alegerea acelei variante de exploatare care asigură un efect economic optim, fie din punctul de vedere al prețului de cost, fie al productivității muncii, fie al eficacității investițiilor. În cazul când se proiectează simultan exploatarea mai multor zăcămint, criteriul pentru alegerea variantei de exploatare a fiecărui zăcămint separat este efectul economic optim, combinat, al exploatării întregului ansamblu de zăcămint, v. B. i.

Pentru demonstrarea lucrărilor din care se compune un proiect complex de exploatare se va lua un exemplu concret.

2. Datele unui exemplu concret de proiectare.

a) Caracterul zăcămintului.

Forma zăcămintului circulară
Regimul de exploatare cu împingere de apă
Suprafața zonei de țiței $F: 600$ ha
Grosimea stratului de țiței $h = 10$ m
Raza conturului de alimentare... $R_c = 10$ km
Permeabilitatea absolută medie a roci colectoare $k = 500$ mD
Viscozitatea țițeiului $\mu_t = 5$ cP
Perozitatea stratului \times coeficientul de extracție \times saturația inițială în țiței $m \cdot \varepsilon \cdot S_{i0} = 0,1$
Costul forajului unei sonde și a utilajului de producție 500 000 ruble
Rezerva extractibilă de țiței a zăcămintului este, conform ecuației (5), egală cu $N_{05} = 6\,000\,000$ m³

Pentru simplificarea calculului coeficientul de volum al țițeiului s-a luat egal cu 1,0.

În mod normal, datele precedente trebuie să rezulte din studiul menționat anterior, prin care se analizează caracterul zăcămintului.

Din punct de vedere calitativ, proprietățile menționate ale proprietăților zăcămintului, exemplu, sînt de considerat ca cifre medii.

b) Variantele de exploatare care se vor analiza. Se vor analiza următoarele variante:

Ca număr de rînduri de sonde: $n_r = 2, 4, 8$ rînduri, plus o sondă în centru (de considerat ca un rînd cu o singură sondă).

Ca distanță între sondele de rînd: $2\sigma = 100, 200, 400, 700$ m.

Deci în total sînt 12 variante.

În practica exploatării, de fapt nu produc simultan mai mult decît primele 2 rînduri de sonde, socotite dela conturul apă-țiței, respectiv gaze-țiței.

3. Partea hidrodinamică a proiectării complexe. a) Amplasarea rațională a rîndurilor. Se procedează conform celor expuse la cap. E, e.

— Determinarea razei conturului apă-țiței se face cu ajutorul formulei:

$$R_t = \sqrt{\frac{F}{\pi}} = \sqrt{\frac{600 \cdot 10000}{\pi}} = 1\,380 \text{ m.}$$

— Determinarea razelor rîndurilor de sonde R_1, R_2, \dots , se face cu ajutorul diagramei B. E. Kazarnovskaia, din fig. 29. Pentru varianta cu opt rînduri de sonde, sonda centrală se consideră drept rîndul al nouălea cu raza $R_9 = 0,1$ m, egală cu raza găurii de sondă r_s . În acest caz se obține:

$$\rho_9 = \frac{0,1}{1380} = 0,0000725.$$

Trasînd o linie paralelă cu axa absciselor la distanța menționată pînă ce taie curba $n_r = 9$ (la scară mărită) din fig. 29, și ducînd prin acest punct de tăiere o linie paralelă cu axa ordonatelor, punctele de intersecție a acestei linii din urmă cu curbele $n_r = 8, n_r = 7$, etc. dau valorile pentru $n_r = 8, n_r = 7$, etc., pe axa ordonatelor. Astfel se obține:

$$\rho_8 = 0,025 = \frac{R_8}{R_t} = \frac{R_8}{1380}$$

$$\rho_7 = 0,110 = \frac{R_7}{R_t} = \frac{R_7}{1380}$$

$$\rho_2 = 0,735 = \frac{R_2}{1380}$$

$$\rho_1 = 0,870 = \frac{R_1}{1380}$$

etc.
din care:

$$R_1 = 1\,200 \text{ m; } R_2 = 1\,015 \text{ m; etc.}$$

$$R_7 = 152 \text{ m; } R_8 = 35 \text{ m}$$

Analog se procedează la varianta cu patru rînduri, considerînd sonda centrală drept rîndul al cincilea, pentru care

$$\rho_5 = 0,0000725$$

Pentru varianta cu două rînduri se va porni de la

$$\rho_s = 0,0000725.$$

Cifrele obținute pentru diferitele valori ρ și R se concentrează într-o tabelă similară tablei 1.

Razele de amplasare a rîndurilor de sonde

$$R_t = 1\,380\text{ m}, \quad r_s = 0,1\text{ m}$$

b) *Debitul zăcămintului.* Pentru fiecare etapă a fiecărei variante de rînduri se determină raza conturului redus de alimentare, cu ajutorul ecuației (68) și fig. 34: introducînd pentru:

$$\mu_a = 1\text{ (cP)}.$$

Pentru prima etapă de exploatare se introduce

$$R_{i-1} = R_0 = R_t,$$

raza conturului inițial de țitei-apă.

— Debitul zăcămintului se determină, pentru fiecare etapă și fiecare variantă de exploatare (atît din punctul de vedere al numărului de rînduri, cît și al distanțelor dintre sonde), cu ecuația (80) (v. și fig. 41).

Δp se ia egal cu 20 at, constant pentru toate sondele, φ_g factorul de corecție, se stabilește pentru fiecare etapă și fiecare variantă de exploatare în funcție de R_{i-1} , R_i și 2σ , cu ajutorul nomogramei din fig. 42. Pentru sonda centrală (considerată drept ultimul rînd) se introduce:

$$R_i = r_s = 0,1\text{ m} = 10\text{ cm și } \rho = 1.$$

c) *Numărul de sonde.* Numărul de sonde ale unui rînd se află cu ecuația:

$$m_i = \frac{\pi R_i}{\sigma} \quad (138)$$

în care:

m_i este numărul de sonde ale rîndului i ;

R_i — raza rîndului i ;

2σ — distanța dintre două sonde ale rîndului.

Ecuația precedentă nu se aplică ultimului rînd, dacă acesta este reprezentat printr-o sondă centrală.

Numărul total al sondelor zăcămintului Σn , este:

$$\Sigma n = \sum_{i=1}^{i=n_r} m_i + 1 = \frac{\pi}{\sigma} \sum_{i=1}^{i=n_r} R_i + 1 \quad (139)$$

în care

n_r este numărul de rînduri, inclusiv cel reprezentat de sonda centrală;

d) *Durata de exploatare.* Durata totală de exploatare a zăcămintului se află cu ajutorul ecuației (121).

Durata de exploatare a unei etape oarecare i se află cu ecuația:

$$t_i = \frac{\pi(R_i^2 - R_{i-1}^2) h \cdot m \cdot \varepsilon \cdot S_{i_0}}{Q_i} \quad (140)$$

în care:

t_i este durata de exploatare a etapei i ;

R_i, R_{i-1} — raza rîndului i respectiv a rîndului $i-1$;

Q_i — debitul rîndului i ;

h — grosimea stratului;

m — porozitatea stratului;

ε — coeficientul de extracție;

S_{i_0} — saturația inițială cu țitei a stratului,

$$m \cdot \varepsilon \cdot S_{i_0} = 0,1.$$

(v. subcapitolul h. 2. a.).

e) *Debitul mediu zilnic al zăcămintului.* Debitul mediu zilnic al zăcămintului se află cu ecuația:

$$Q_m = \frac{N_{0e}}{\sum_{i=1}^{i=n_r} t_i} \quad (141)$$

în care:

Q_m este debitul mediu zilnic al zăcămintului

în m^3/zi ;

N_{0e} — rezerva de țitei economic extractibilă a zăcămintului ($6\,000\,000\text{ m}^3$);

$\sum_{i=1}^{i=n_r} t_i$ — durata totală de exploatare a zăcămintului în zile.

Tabela 1. Valorile θ_n , la diferite variante de gabarit

Numărul rîndurilor	Rezultatul	$n_r = 1$	2	3	4	5	6	7	8	9
2	$\rho_n = \frac{R_1}{R_t}$	0,512	0,130	0,0000725						
	R_n	707	180	0,1						
4	$\rho_n = \frac{R_1}{R_t}$	0,740	0,492	0,230		0,073	0,0000725			
	R_n	1 020	678	345		90	0,1			
8	$\rho_n = \frac{R_1}{R_t}$	0,870	0,735					0,110	0,025	0,0000725
	R_n	1 015	1 200					152	35	0,1

f) Concentrarea rezultatelor calculelor hidrodinamice. Cifrele obținute din calculele hidrodinamice se concentrează în tabela 3 (v. pag. 539).

g) Influența mărimii parametrilor zăcămintului asupra rezultatelor obținute. Cifrele care se obțin la calculele hidrodinamice ale exploatarei zăcămintelor variază în funcție de variația parametrilor acestora.

În tabela 2 se indică sensul în care variază unele dintre rezultatele calculului hidrodinamic în cazul când crește numai valoarea unui parametru, ceilalți parametri rămânând neschimbați.

Dacă valorile parametrilor zăcămintului scad, rezultatele de calcul din tabela 2 care nu se schimbă la creșterea parametrului, rămân neschimbate și la micșorarea lui, iar celelalte rezultate variază în sensul opus celui indicat în tabelă.

În cazul când variază, formă zăcămintului, rezultatele de calcul variază, comparativ cu forma circulară, în sensul următor:

La un zăcămint linear cu aceleași valori de suprafață, grosime, distanța conturului

- numărul de sonde Σn crește;
- debitul mediu al zăcămintului Q_m scade mult;

- durata de exploatare $\sum_{i=1}^{i=n} t_i$ crește.

La un zăcămint oval cu aceleași valori de suprafață, grosime, distanța conturului, permeabilitate, viscozitate:

- numărul sondelor Σn crește mult;
- debitul mediu al zăcămintului Q_m crește;
- durata de exploatare $\sum_{i=1}^{i=n} t_{(i)}$ scade.

În fig. 58—63 se reprezintă variația debitului mediu al zăcămintului-exemplu Q_m , în funcție

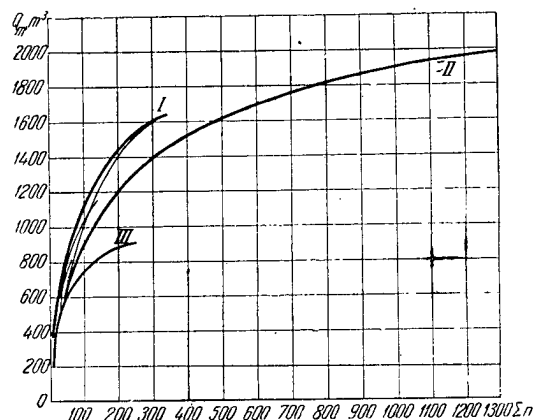


Fig. 58. Debitul mediu zilnic al unui zăcămint Q_m , în funcție de numărul de sonde Σn , pentru diferite suprafețe F . I: $F = 3\,000$ ha; II: $F = 600$ ha; III: $F = 100$ ha.

de numărul total de sonde Σn , dacă variază cîte unul dintre parametrii din tabela menționată.

În fig. 58 este reprezentată variația lui Q_m , în funcție de Σn , dacă variază suprafața F a zăcămintului-exemplu. Prezentarea s-a făcut în felul următor: pentru zăcămintul-exemplu $F = 600$ ha, pentru variantele cu 2, respectiv cu 4, respectiv cu 8 rinduri de sonde, s-a trasat cîte o curbă care reprezintă funcția $Q_m = f(\Sigma n)$. La fiecare dintre aceste trei curbe se cunosc cîte patru perechi de valori (Q_m , Σn), corespunzătoare unui σ de 50, 100, 200 și 350 m, din tabela 3. Apoi s-a trasat înfășurătoarea celor trei curbe menționate, curba I, care reprezintă în general variația debitului

Tabela 2. Sensul variației rezultatelor de calcul hidrodinamic la creșterea parametrilor

Parametrul care crește	Sensul variației rezultatelor la		
	Numărul de sonde	Debitul mediu al zăcămintului	Durata totală de exploatare
Suprafața zonei de țiciei	crește	crește	crește
Grosimea stratului	neschimbat	crește proporțional	neschimbat
Raza conturului de alimentare	neschimbat	scade	crește
Permeabilitatea	neschimbat	crește proporțional	scade proporțional
Viscozitatea țicieiului	neschimbat	scade	crește
$m \cdot e \cdot S_{t_0}$	neschimbat	neschimbat	crește proporțional

mediu al zăcămintului-exemplu în funcție de numărul total de sonde. În mod similar s-a găsit curba II, respectiv curba III care reprezintă în general, variația debitului mediu, în funcție de numărul total de sonde al zăcămintului, la care însă suprafața s-a mărit la $F = 3\,000$ ha respectiv s-a micșorat la 100 ha.

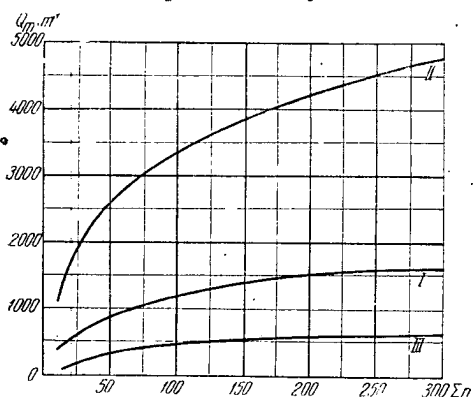


Fig. 59. Debitul mediu zilnic al unui zăcămint Q_m , în funcție de numărul de sonde Σn pentru diferite grosimi ale stratului, h . I: $h = 10$ m; II: $h = 30$ m; III: $h = 4$ m.

Fig. 59 reprezintă funcțiile $Q_m = f(\Sigma n)$, dacă variază grosimea stratului h și anume:

- curba I, pentru zăcămintul-exemplu cu $h = 10$ m,
- curba II, pentru același zăcămint, însă cu $h = 30$ m,
- curba III, pentru același zăcămint, însă cu $h = 4$ m.

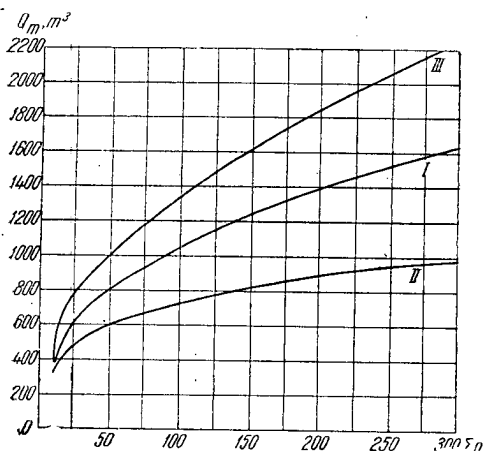


Fig. 60. Debitul mediu zilnic al unui zăcămint Q_m , în funcție de numărul de sonde Σn pentru diferite raze ale conturului de alimentare R_c . I: $R_c = 10$ km; II: $R_c = 50$ km; III: $R_c = 2$ km.

Fig. 60 reprezintă funcțiile $Q_m = f(\Sigma n)$, dacă variază raza conturului de alimentare a zăcămintului R_c și anume:

- curba I, pentru zăcămintul-exemplu cu $R_c = 10$ km,
- curba II, pentru același zăcămint, însă cu $R_c = 50$ km,
- curba III pentru același zăcămint, însă cu $R_c = 2$ km.

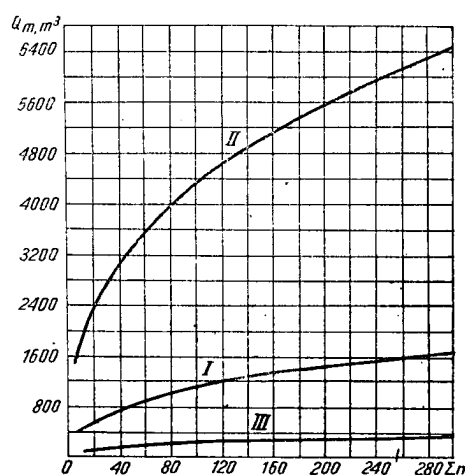


Fig. 61. Debitul mediu zilnic al unui zăcămint Q_m , în funcție de numărul de sonde Σn , pentru diferite permeabilități, k . I: $k = 500$ mD; II: $k = 2000$ mD; III: $k = 100$ mD.

Fig. 61 reprezintă funcțiile $Q = f(\Sigma n)$ dacă variază permeabilitatea stratului k și anume:

- curba I, pentru zăcămintul-exemplu, cu $k = 500$ mD,
- curba II, pentru același zăcămint, însă cu $k = 2000$ mD,
- curba III, pentru același zăcămint, însă cu $k = 100$ mD.

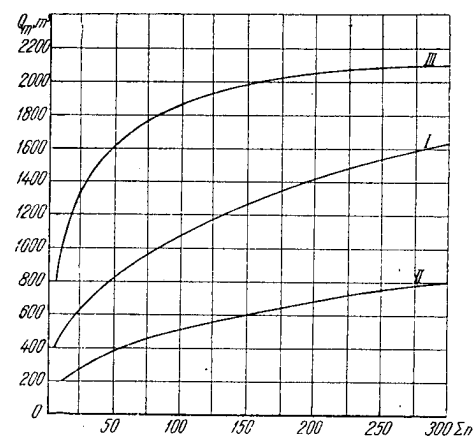


Fig. 62. Debitul mediu zilnic al unui zăcămint Q_m , în funcție de numărul de sonde Σn , pentru diferite viscozități μ_t ale țițeiului. I: $\mu_t = 5$ cP; II: $\mu_t = 15$ cP; III: $\mu_t = 2$ cP.

Fig. 62 reprezintă funcțiile $Q_m = f(\Sigma n)$, dacă variază viscozitatea Țițeiului μ_t și anume:

- curba I, pentru zăcămintul-exemplu, cu $\mu_t = 5$ cP,
- curba II, pentru același zăcămint, însă cu $\mu_t = 15$ cP,
- curba III, pentru același zăcămint, însă cu $\mu_t = 2$ cP.

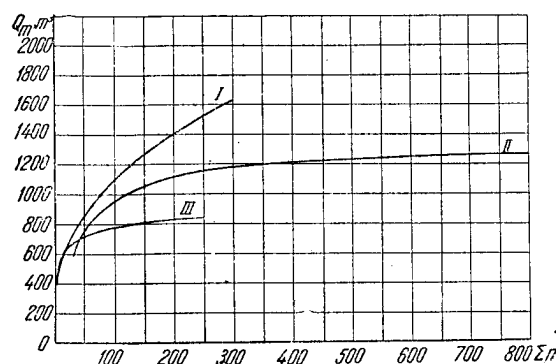


Fig. 63. Debitul mediu zilnic al unui zăcămint Q_m , în funcție de numărul de sonde Σn , pentru diferite forme ale suprafeței petroliere: I: circulară, II: ovală, III: liniară.

Fig. 63 reprezintă funcțiile $Q_m = f(\Sigma n)$, dacă variază forma zăcămintului și anume:

- curba I, pentru zăcămintul-exemplu, cu forma circulară,
- curba II, pentru același zăcămint, însă cu forma ovală,
- curba III, pentru același zăcămint, însă cu forma liniară.

4. Partea economică a proiectării complexe.

a) Calcule preliminare.

1) Stabilirea numărului de sonde productive în fiecare etapă de exploatare. În cazul cînd se presupune că toate sondele zăcămintului se pun simultan în producție, în prima

etapă de exploatare, adică pînă la inundarea primului rînd de sonde, numărul de sonde productive este egal cu numărul total de sonde pe zăcămint, Σn , adică:

$$\Sigma_1 n = \Sigma_t n$$

În cea de a doua etapă de exploatare, adică de la inundarea primului rînd de sonde pînă la inundarea celui de al doilea rînd, numărul de sonde productive este egal cu:

$$\Sigma_{II} n = \Sigma_t n - m_1$$

în care:

m_1 este numărul de sonde, din primul rînd.

Tot astfel se află și numărul de sonde productive în cea de a treia etapă de exploatare:

$$\Sigma_{III} n = \Sigma_t n - m_1 - m_2$$

în care:

m_2 este numărul de sonde din cel de al doilea rînd etc.

Rezultatele acestor calcule, pentru toate variantele de exploatare, se concentrează în tabela 4. Numărul de sonde ale fiecărui rînd se află cu ajutorul tabelii 3.

2) Stabilirea duratei fiecărei etape de exploatare în ani. Rezultatele se obțin împărțindu-se cifrele din coloanele 17—20 ale tabelii nr. 3 prin 365 (v. tabela 5).

3) Stabilirea volumului de lucrări în sonde \times ani pe etape de exploatare. Rezultatele se obțin înmulțindu-se cele două valori corespunzătoare din coloanele 3—11 ale tabelilor 4 și 5 (v. tabela 6).

4) Stabilirea suprafeței care revine unei sonde. Suprafața care revine unei sonde, F_s , se stabilește împărțindu-se suprafața totală a «schelei» F , prin numărul total de sonde ale zăcămintului, care se găsește în coloana a 3-a a tabelii 4.

Tabela 3. Numărul sondelor productive în fiecare variantă de exploatare

Variantele		Numărul sondelor productive în etape								
Numărul de rînduri (1)	2σ (2)	I (3)	II (4)	III (5)	IV (6)	V (7)	VI (8)	VII (9)	VIII (10)	IX (11)
2	100	58,9	13,3	1,0						
	700	11,0	5,6	1,0						
4	100	139,1	74,1	..	7,7	1,0				
	700	24,2	14,0	..	2,8	1,0				
8	100	303,6	227,2	..	..	..	..	..	4,2	1,0
	700	50,9	39,2	..	..	..	..	..	2,3	1,0

Tabela 4. Numărul sondelor productive în fiecare variantă de exploatare

Variantele	Numărul de sonde productive, în etape									
numărul de rînduri (1)	2σ (2)	I (3)	II (4)	III (5)	IV (6)	V (7)	VI (8)	VII (9)	VIII (10)	IX (11)
2	100	58,9	13,3	1,0						
	700	11,0	3,6	1,0						
4	100	139,1	74,1	..	7,7	1,0				
	700	24,2	14,0	..	2,8	1,0				
8	100	303,6	227,2	..	..	..	..	..	4,2	1,0
	700	50,9	39,2	..	..	..	..	..	2,3	1,0

Tabela 5. Durata de exploatare a fiecărei etape în ani

Variantele	Durata de exploatare a etapei în ani										Durata totală (12)
Numărul de rînduri (1)	2σ (2)	I (3)	II (4)	III (5)	IV (6)	V (7)	VI (8)	VII (9)	VIII (10)	IX (11)	
2	100	10,8	7,4	2,0							20,3
	700	22,6	19,7	2,0							44,0
4	100	4,2	3,8	..	2,3	0,5					14,2
	700	8,3	8,2	..	7,9	0,5					33,0
8	100	1,8	1,6	..	..	..	..	..	0,8	0,07	10,3
	700	3,6	3,3	..	..	..	..	..	2,5	0,07	23,5

Tabela 6. Volumul de lucrări al fiecărei etape în sonde × an

Variantele	Volumul de lucrări al etapei sondei × an										Total (12)
Numărul de rînduri (1)	2σ (2)	I (3)	II (4)	III (5)	IV (6)	V (7)	VI (8)	VII (9)	VIII (10)	IX (11)	
2	100	638	98	2,0							738
	700	244	71	2,0							317
4	100	590	284	..	18	0,5					994
	700	200	114	..	22	0,5					393
8	100	540	370	..	..	..	..	..	3,2	0,07	1 392
	700	180	130	..	..	..	..	..	5,6	0,07	545

Suprafața «schelei» se află cu ecuația:

$$F = (R_1 + 180)^2 \pi \quad (142)$$

în care:

R_1 este raza primului rînd de sonde.

Suprafața pe sondă astfel obținută, este suprafața medie pe toată durata de exploatare a variantelor respective (v. tabela 7). Este de observat că suprafața care revine unei sonde, nu este egală cu zona de drenaj a acestei sonde, adică cu porțiunea din strat care este efectiv drenată de ea.

b) Calculul productivității muncii.

1) Munca depusă de muncitorii direcți la sondele în producție.

Tabela 7. Suprafața care revine unei sonde

Variantele		R_1 m (3)	F ha (4)	F_1 ha/s (5)
Numărul de rînduri (1)	2σ (2)			
2	100	707	261	4,4
	700			23,7
4	100	1 020	453	3,3
	700			18,7
8	100	1200	600	2,0
	700			11,8

Numărul de muncitori direcți M_d , necesari pentru o sondă în producție se stabilește ori cu ajutorul diagramei din fig. 50, ori cu ecuația (134):

$$M_d = 0,85 F_s^{0,77} + 0,5 \quad (134)$$

în care F_s este suprafața, în ha, care revine unei sonde conform tabelii 7, coloana 5. Înmulțind pentru fiecare variantă de exploatare cifra pentru M_d , cu volumul total de lucrări ale acestei variante (v. tabela 6, coloana 12), se obține munca totală depusă de muncitorii direcți la sondele în producție, pe toată durata de exploatare. Toate cifrele se concentrează conform tabelii 8.

Tabela 8. Munca depusă de muncitorii direcți la sondele în producție

Variantele		Muncitori pe sonde	Volumul de lucrări sondă × ani	Munca totală oameni × ani
Numărul de sonduri	2σ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
2	100	3,0	738	2 275
	700	7,9	317	2 523
4	100	2,6	994	2 587
	700	6,9	393	2 713
8	100	1,9	1 394	2 647
	700	5,3	545	2 890

2) Munca depusă de muncitorii auxiliari și de salariații tehnico-administrativi, la sondele în producție. Munca acestor două categorii de personal se stabilește fie cu ajutorul

curbelor din fig. 51 și 52, fie adunind ecuațiile (135) și (136), obținându-se:

$$M_a + M_t = \frac{17}{(\Sigma n)^{0,8}} + \frac{23}{(\Sigma n)^{0,8}} = \frac{40}{(\Sigma n)^{0,8}} \quad (143)$$

în care:

M_a este numărul de muncitori auxiliari, necesari pentru o sondă în producție;

M_t — numărul de salariați tehnico-administrativi, necesari pentru o sondă în producție;

Σn — numărul de sonde în producție ale șantierului.

Deoarece numărul de sonde în producție variază mult de la o etapă la alta de exploatare (v. tabela 4), calculul valorii $M_a + M_t$ trebuie făcut întâi pentru fiecare etapă de exploatare separat. Munca depusă într-o etapă de exploatare se află înmulțind valoarea respectivă pentru $M_a + M_t$ cu volumul de lucrări al acestei etape (v. tabela 6).

Cifrele pentru fiecare variantă și etapă de exploatare se concentrează conform tabelii 9.

3) Munca depusă pentru forajul sondelor. Se presupune că la dezvoltarea zăcămintului lucrează simultan zece granice, fiecare granic forind câte șase sonde pe an. În cazul când conform curbelor din fig. 54 pentru un granic trebuie 58 de oameni, munca necesară pentru forajul sondelor unei variante în oameni × ani este egală cu:

$$\frac{58}{6} \Sigma n$$

în care Σn este numărul total de sonde din varianta respectivă (v. tabela 4, coloana 3).

Cifrele pentru fiecare variantă se concentrează conform tabelii 10.

Tabela 9. Munca depusă de muncitorii auxiliari și de salariații tehnico-administrativi la sondele în producție

Variantele		Munca, oameni × ani, depusă în etapa										Munca totală depusă, oameni × ani
Numărul de sonduri	2σ		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
2	100	pe sondă	1,6	4,4	40,0							1 523
		pe etapă	1 004	438	81							
4	100	pe sondă	5,4	14,3	40,0							
		pe etapă	1 320	1 015	81							2 416
8	100	pe sondă	0,6	1,3	7,7	40,0						1 157
		pe etapă	371	364	135	19						
8	100	pe sondă	3,1	4,5	17,3	40,0						2 028
		pe etapă	624	520	387	19						
8	100	pe sondă	0,4	0,5	..	..	..	..	..	12,6	40,0	992
		pe etapă	209	192	..	..	..	..	..	40,3	0,2	
8	100	pe sondă	1,8	2,1	..	..	..	..	..	20,5	40,0	
		pe etapă	320	277	..	..	..	..	..	116	0,2	1 653

EXPLOATAREA RAȚIONALĂ A ZĂCĂMINTELOR DE ȚITEI

533

Tabela 10. Munca depusă pentru forajul sondelor

Variantele		sonde (3)	Munca depusă, oameni × ani (4)
Numărul de rînduri (1)	2σ (2)		
2	100	58,9	570
	700	11,0	106
4	100	139,1	1 344
	700	24,2	234
8	100	303,6	2 930
	700	50,9	493

4) Productivitatea muncii. Productivitatea muncii se obține împărțind pentru fiecare variantă de exploatare, rezerva extractibilă de țiței-țiței (6 000 000 m³) prin suma muncii depuse (de la punctele 1), 2) și 3), (v. tabelele 8, 9 și 10). Rezultatele se concentrează conform tablei 11.

c) Calculele eficacității investițiilor.

1) Eficacitatea investițiilor totale. Investițiile pentru forajul sondelor și pentru utilizarea lor pentru producție se

determină pentru fiecare variantă de exploatare înmulțind numărul respectiv total de sonde (tabela 4, coloana 1), cu cifra de 500 000 (ruble), care se ia în exemplul dat drept costul forării și utilizării pentru producție a unei sonde.

Investițiile generale necesare exploatării zăcămintului se determină pentru fiecare variantă de exploatare înmulțind numărul respectiv total de sonde (tabela 4, coloana 1) cu investițiile necesare pentru o sondă. Acestea se obțin conform fig. 55 care dă investițiile generale necesare unei sonde în funcție de suprafața care-i revine (v. tabela 7 coloana 5).

Raportul dintre rezerva extractibilă de țiței și totalul investițiilor în ruble dă eficacitatea lor.

Toate cifrele se concentrează conform tablei 12.

2) Eficacitatea consumului de metal. Pentru exemplul de calcul folosit, se presupune că materialul tubular necesar pentru forajul și utilizarea unei sonde pentru extracție (burlane plus țevi de extracție) are, conform programului de tubaj, greutatea de 75 t. Deci pentru fiecare variantă de exploatare se determină consumul de metal în t, înmulțind numărul respectiv total de sonde (tabela 4 coloana 1) cu cifra 75.

Tabela 11. Productivitatea muncii

Variantele		Munca depusă				Productivitatea muncii m ³ oameni × ani (7)
Numărul de rînduri (1)	2σ (2)	Muncitori direcți de producție oameni × ani (3)	Muncitori auxil. tehnico-adm. în producție oameni × ani (4)	Foraj sonde oameni × ani (5)	Total oameni × ani (6)	
2	100	2 275	1 523	570	4 368	1 375
	700	2 523	2 416	106	5 045	1 190
4	100	2 587	1 157	1 344	5 098	1 180
	700	2 718	2 028	234	4 975	1 208
8	100	2 647	992	2 930	6 569	915
	700	2 890	1 653	493	5 036	1 190

Tabela 12. Eficacitatea investițiilor

Variantele		Investițiile în milioane de ruble				Eficacitatea investițiilor m³ țiței/rublă
Numărul de rînduri	2σ	Foraj utilaj sonde	Investiții generale			
			pe sondă	global	total	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
2	100	29,4	0,065	3,84	33,24	0,18
	700	5,5	0,134	1,47	6,97	0,86
4	100	69,5	0,058	8,06	77,56	0,077
	700	12,1	0,122	2,95	15,05	0,40
8	100	151,8	0,048	14,56	166,36	0,036
	700	25,4	0,099	5,04	30,44	0,20

Consumul de metal necesar instalațiilor de suprafață (conducte), se află înmulțind numărul de sonde cu consumul unei sonde. Acesta se obține conform fig. 56, care dă consumul de metal pentru conductele necesare pe sonda în producție, în funcție de suprafața care-i revine (tabela 6, coloana 6).

Raportul dintre rezerva extractivă de țiței și consumul total de metal dă eficacitatea lui. Toate cifrele se concentrează conform tabeli 13.

d) *Calculul prețului de cost.*

1) Cheltuielile de întreținere. Conform ecuației (137), respectiv fig. 57, cheltuielile de întreținere pe sondă depind atât de suprafața F , care-i revine, cât și de numărul de sonde productive, Σn al șantierului.

Deoarece numărul de sonde productive ale șantierului variază mult de la o etapă la alta,

cheltuielile de întreținere ale diferitelor variante de exploatare trebuie calculate pe fiecare etapă separat și apoi adunate.

Prin urmare în ecuația (137) se introduc pentru Σn și F , valorile corespunzătoare din tabelele 4 și 7 și valorile găsite pentru E , se înmulțesc cu numărul corespunzător de sonde \times ani din tabela 6, obținându-se astfel cheltuielile totale de întreținere pe etape corespunzătoare. În mod similar se poate folosi și fig. 57.

Toate cifrele se concentrează conform tabeli 14.

2) Cheltuielile totale de exploatare și prețul de cost. Cheltuielile totale de exploatare se obțin adăugându-se la cheltuielile de întreținere, amortizarea investițiilor.

Tabela 13. Eficacitatea consumului de metal

Variantele		Consumul de metal în t				Eficacitatea consumului m³/țiței/kg metal
Numărul de rînduri	2σ	Foraj utilaj sonde	Conducta		Total consum	
			pe sondă	global		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
2	100	4 475	11,5	678	5 103	1,17
	:	:	:	:	:	:
	700	825	22,5	248	1 073	5,58
4	100	10 430	10,0	1 390	11 820	0,51
	:	:	:	:	:	:
	700	1 810	20,5	497	2 307	2,49
8	100	22 750	8,5	2 580	25 330	0,24
	:	:	:	:	:	:
	700	3 824	17,5	890	4 714	1,27

Tabela 14. Cheltuieli de întreținere la extracție

Variantele		Cheltuielile de întreținere în mii de ruble, în etapa										Cheltuielile pe toată durata în mii ruble (13)
Numărul de rânduri	2σ		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
2	100	pe sondă	62,5	91,5	133	—	—	—	—	—	—	—
		—an										
	:	pe etapă	39 875	9 004	271	—	—	—	—	—	—	49 150
700	pe sondă	129,5	150,0	167,5	—	—	—	—	—	—	—	—
		—an										
	:	pe etapă	31 611	10 650	342	—	—	—	—	—	—	42 603
4	100	pe sondă	40,5	53,5		97,5	128	—	—	—	—	—
		—an										
	:	pe etapă	23 900	15 221		1 097	63	—	—	—	—	47 985
700	pe sondă	108,5	119,0		149,5	162	—	—	—	—	—	—
		—an										
	:	pe etapă	21 700	13 602		3 364	79	—	—	—	—	46 190
5	100	pe sondă	18	23						99,5	127	—
		—an										
	:	pe etapă	9 720	8 400						317	8	37 352
700	pe sondă	84	89							143	159	—
		—an										
	:	pe etapă	15 270	11 660						808	11	51 474

Dacă se presupune că investițiile se amortizează în decursul exploatării, la cheltuielile de întreținere din tabela 14, coloana 13, se adaugă sumele investite, conform tabeli 12 coloana 6.

Totalul cheltuielilor de exploatare, împărțit prin rezerva de țiței extractibilă, dă prețul de cost al exploatării.

Toate cifrele se concentrează conform tablei 15.

Tabela 15. Cheltuielile totale și prețul de cost

Numărul de rinduri (1)	2σ (2)	Cheltuielile în milioane de ruble			Prețul de cost ruble/m ³ țiței (6)
		Întreținere (3)	Investiții (4)	Total (5)	
2	100	49,15	33,24	82,39	13,7
	700	42,60	6,97	49,57	8,3
4	100	47,98	77,56	125,54	20,9
	700	46,19	15,05	61,24	10,2
8	100	37,35	166,36	203,71	33,8
	700	51,47	30,44	81,91	8,6

3. Influența mărimii parametrilor zăcămintului asupra prețului de cost. Cum s-a menționat în partea hidrodinamică a proiectării complexe, schimbarea mărimii parametrilor zăcămintului produce și o schimbare a rezultatelor calculului hidrodinamic, în ce privește numărul sondelor, debitul mediu al zăcămintului și durata lui de exploatare. De aceste cifre, cum și de rezerva extractibilă a zăcămintului depinde prețul de cost al exploatării.

În tabela 16 se indică sensul în care variază prețul de cost, dacă se schimbă mărimea unui parametru al zăcămintului, ceilalți parametri rămânând neschimbați.

e) Caracterul general al variației indicilor tehnico-economici în funcție de variantele de exploatare.

1) Productivitatea muncii și prețul de cost. Fig. 64 reprezintă grafic cum variază, în funcție de numărul sondelor șantierului Σn respectiv de F_s , pre-

țul de cost C , și productivitatea muncii P_m de la o variantă de exploatare la alta, pentru zăcămintul-exemplu dat.

Cum se vede în figură, pentru cele trei variante de număr de rinduri, productivitatea muncii are câte un maximum respectiv câte un punct optim și anume pentru Σn între 60 și circa 35 de sonde, respectiv pentru F_s între 10 și 18 ha pe sondă.

Optimul obținut îl are varianta cu două rinduri de sonde: pentru $\Sigma n = 35$ de sonde, respectiv $F_s = 18$ ha pe sondă.

În ce privește prețul de cost, acesta este mare când numărul de sonde Σn este mare. Când numărul de sonde se micșorează, prețul de cost scade și el; scăderea este monotonă adică fără punct de minim. La început scăderea prețului de cost este rapidă, apoi din ce în ce mai lentă, formînd în cele din urmă o linie aproape paralelă cu axa absciselor.

2) Eficacitatea investițiilor.

Fig. 65 reprezintă grafic cum variază, în funcție de numărul de sonde ale șantierului Σn , respectiv de suprafața F_s , care revine unei sonde, eficacitatea globală și eficacitatea medie anuală a investițiilor.

Eficacitatea medie anuală a investițiilor este mică la un număr mare de sonde Σn ; dacă se micșorează numărul de sonde, eficacitatea investițiilor crește întâi rapid, apoi din ce în ce mai lent, curba devenind în cele din urmă aproape paralelă cu axa absciselor.

Comparînd curbele din fig. 64 și 65, se ajunge la concluzia că în mod practic, din punct de vedere economic, condițiile de exploatare optime se obțin cînd suprafața pe sondă F_s nu depășește 16–20 ha/sondă, deoarece suprafața depășind această valoare, prețul de cost și eficacitatea investițiilor se îmbunătățesc într-o măsură neînsemnată, în timp ce productivitatea muncii scade simțitor.

i. Proiectarea complexă a exploatării unui grup de zăcăminte

1. Principiile generale. Dacă în vederea realizării Planului de Stat pentru producția de țiței există un singur zăcămint nou a cărui exploatare trebuie proiectată, stabilirea nivelului de producție a acestui zăcămint depinde,

Tabela 16. Variația prețului de cost în funcție de parametrii zăcămintului

Parametrul variabil independent	Sensul variației prețului de cost
1. Suprafața zăcămintului	Crește cu mărirea suprafeței, crește și mai mult cu micșorarea suprafeței
2. Grosimea stratului	Variază invers proporțional cu grosimea
3. Raza conturului de alimentare	Crește cu mărirea razei și scade cu micșorarea ei
4. Permeabilitatea	Scade cu creșterea permeabilității și crește cu scăderea ei
5. Viscositatea țițeiului	Crește cu creșterea viscozității și scade cu scăderea ei
6. Valoarea $m \cdot S_{10}$	Scade cu creșterea valorii și crește cu scăderea ei
7. Forma zăcămintului	Crește dacă zăcămintul este liniar, crește și mai mult dacă zăcămintul este oval
8. Costul forajului	Crește cu creșterea costului forajului și scade cu scăderea lui
9. Cheltuielile de exploatare	Crește cu creșterea cheltuielilor și scade cu micșorarea lor

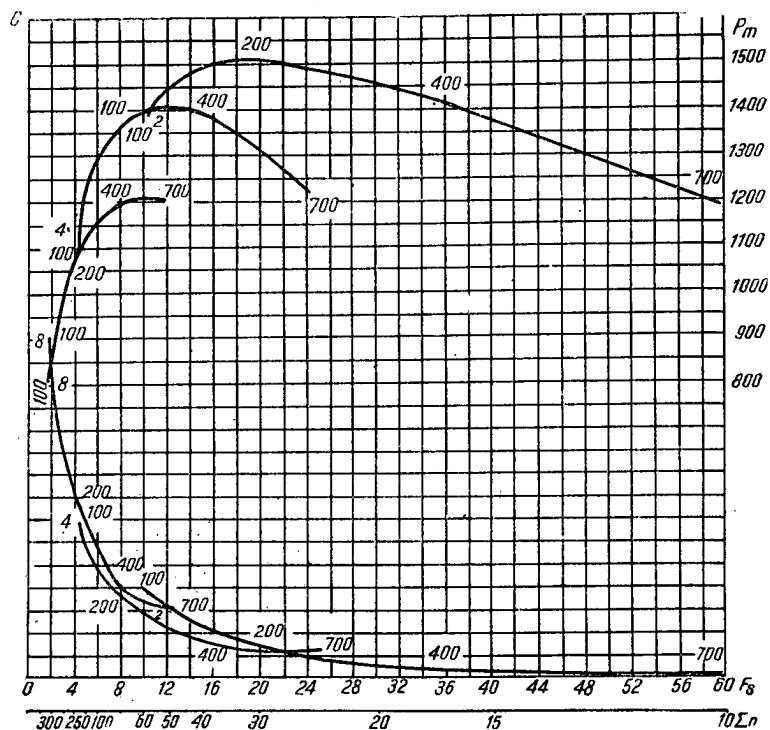
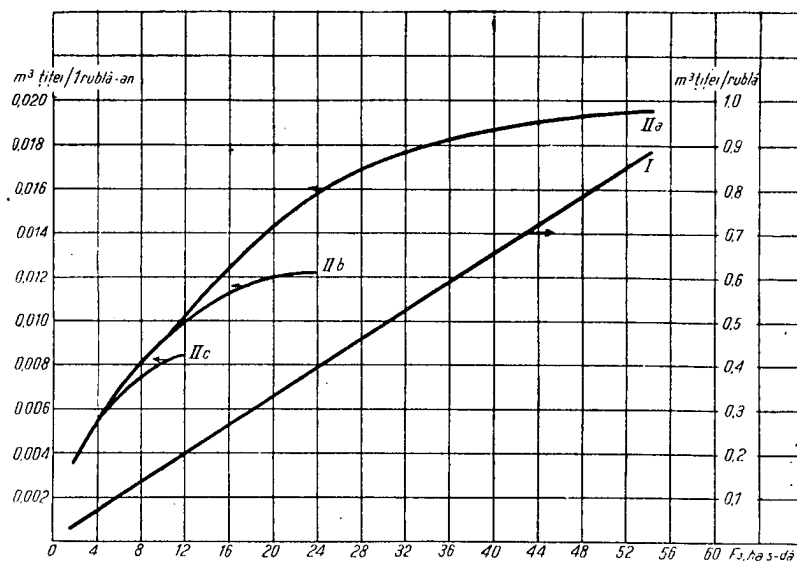


Fig. 64. Productivitatea muncii și prețul de cost, în funcție de sistemul de amplasare a sondelor.

Fig. 65. Curba I: eficacitatea globală a investițiilor, m^3 țiței/rublă, în funcție de numărul de sonde Σn , respectiv de suprafața pe sondă, F_8 . Curbele II: eficacitatea medie anuală a investițiilor, m^3 țiței/rublă \times an, în funcție de Σn , respectiv de F_8 : II a: pentru 2 rânduri de sonde, II b: pentru 4 rânduri: II c: pentru 8 rânduri.

în primul rând, de cerințele Planului de Stat și condițiile economice de exploatare sînt subordonate acestor cerințe. În consecință, în cazul unui singur zăcămint disponibil, indicii tehnico-economici de exploatare nu vor fi cei optimi posibili. Desigur că acești indici nu se pot înrăutăți astfel încît exploatarea zăcămintului să devină nerentabilă, în sensul că mărirea nivelului de producție — peste o anumită limită — să producă o mărirea a cheltuielilor care nu este compensată de valoarea economică a mării producției.

Dacă însă se proiectează simultan exploatarea mai multor zăcămint de țiței, fie că este vorba de mai multe structuri în localități diferite, fie de o singură structură cu mai multe complexe, separate între ele din punct de vedere hidrodinamic și cu diferite proprietăți fizice, sarcina proiectării constă în repartizarea producției totale prescrisă de Plan în timp și pe fiecare zăcămint în parte — astfel încît condițiile economice de exploatare, luate în ansamblu pe toate zăcămintele, să fie cele optime.

2. Repartizarea producției curente pe un grup de zăcămint. Condițiile economice de exploatare a zăcămintelor sînt caracteristice

în care:

- Q este producția curentă totală a tuturor zăcămintelor;
- Q_1, Q_2, \dots, Q_r — producția curentă a fiecărui zăcămint în parte;
- r — numărul zăcămintelor;
- E — cheltuielile totale anuale de exploatare, pentru toate zăcămintele;
- E_1, E_2, \dots, E_n — cheltuielile anuale de exploatare pe fiecare zăcămint în parte.

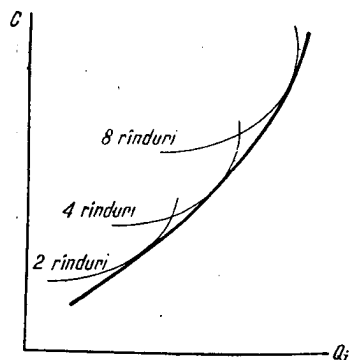


Fig. 66. Prețul de cost, în funcție de debitul anual al zăcămintului.

prin valorile indicilor economici dintre care se ia în considerare în primul rând prețul de cost, avîndu-se în vedere că pentru toate zăcămintele, cheltuielile totale de exploatare, de exemplu pe an, trebuie să devină minime.

În acest scop se procedează în felul următor:

— Se construiește pentru fiecare zăcămint (după cele expuse la h. 1—4.) cîte o serie de curbe care reprezintă, pentru diferitele variante de exploatare, prețul de cost c , în funcție de producția anuală a zăcămintului respectiv. Curbele astfel obținute se unesc printr-o curbă înfășurătoare ca în fig. 66. Pentru aceste curbe se pot forma următoarele ecuații:

$$\begin{aligned} QC &= Q_1 C_1 + Q_2 C_2 + Q_3 C_3 + \dots + Q_r C_r \\ Q &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \quad (144) \\ E &= E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \end{aligned}$$

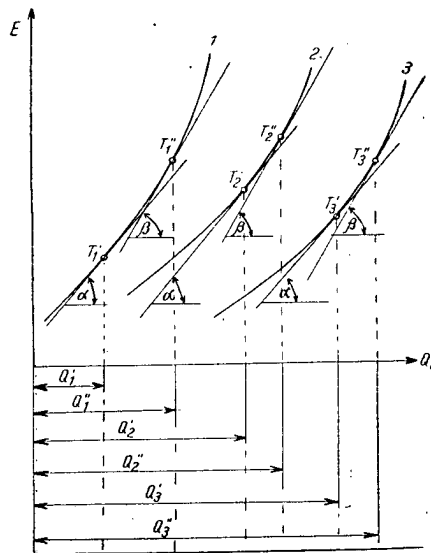


Fig. 67. Cheltuielile anuale de exploatare E , în funcție de debitul anual Q_i , pentru zăcămintele 1, 2 și 3.

După Lagrange, pentru ca E să devină un minim, trebuie îndeplinită condiția:

$$\frac{\partial E_1}{\partial Q_1} = \frac{\partial E_2}{\partial Q_2} = \dots = \frac{\partial E_r}{\partial Q_r} \quad (145)$$

Pentru fiecare zăcămint se construiește cîte o curbă care reprezintă cheltuielile anuale de exploatare, în funcție de producția anuală de țiței, cum se vede în fig. 67. Se duce la toate curbele cîte o tangentă formînd același unghi oarecare α cu axa absciselor. Punctele de contact T_1', T_2', \dots, T_r' ale tangentelor cu curbele 1, 2, ..., r au drept abscise producțiile anuale Q_1', Q_2', \dots, Q_r' pentru care este satisfăcută condiția din ecuația (145), deci, dacă producția tuturor zăcămintelor:

$$Q' = Q_1' + Q_2' + \dots + Q_r'$$

Q_1', Q_2', \dots, Q_r' este producția [anuală] a necărui zăcămint în parte la care cheltuielile totale de exploatare sînt minime.

— Se trasează un nou sistem de coordonate în care se duce o paralelă cu axa absciselor la distanța Q' (v. fig. 68). Pe această paralelă se fixează punctele $A'_1, A'_2 \dots$ cu abscisele $Q'_1, Q'_2 \dots$.

— La curbele $E = f(Q)$ din fig. 67 se duce o a doua serie de tangente, toate formînd

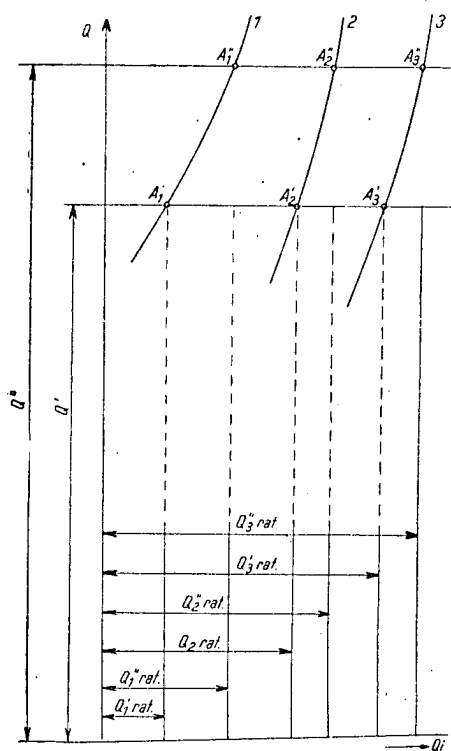


Fig. 68. Relațiile dintre debitul total al unui grup de zăcăminte Q și debitele raționale Q_1, Q_2, Q_3 , de repartizat fiecărui zăcămint 1, 2, 3.

unghiul β cu axa absciselor. Punctele de contact T''_1, T''_2, \dots au drept abscise producțiile anuale Q''_1, Q''_2, \dots .

În fig. 68 se duce o nouă paralelă cu axa absciselor la distanța:

$$Q'' = Q''_1 + Q''_2 + \dots + Q''_n$$

și se fixează pe ea punctele $A''_1, A''_2 \dots A''_n$, care au abscisele $Q''_1, Q''_2 \dots$.

— Se mai duc încă cîteva serii de tangente la curbele din fig. 67 și se stabilesc, în același mod, punctele $A'''_1, A'''_2, \dots, A''''_1, A''''_2 \dots$ etc.

În fig. 68 se formează cîte o curbă din punctele $A_1, A'_1, A''_1, \dots, A_2, A'_2, A''_2 \dots$ etc. Fiecare dintre aceste curbe este locul geometric al punctelor a căror abscisă este producția anuală optimă corespunzătoare la

producția totală a grupului de zăcămint, determinată prin ordonata acestui punct.

— Deci, dacă pentru totalitatea zăcămintului se prescrie o anumită producție anuală curentă Q , o paralelă cu axa absciselor din fig. 68 dusă la distanța Q , taie curbele 1, 2... în punctele ale căror abscise sînt egale cu producțiile curente anuale optime ale zăcămintelor respective 1, 2...

— Cunoșcînd producția curentă a fiecărui zăcămint, se poate stabili cu ajutorul unei diagrame asemănătoare cu diagramele din fig. 58—63, numărul de sonde și de rînduri de sonde care trebuie amplasate.

— Rezultatele astfel obținute se verifică, analizîndu-le în același mod din punctul de vedere al celorlalți indici tehnico-economici, în speță al productivității muncii și al eficacității investițiilor.

k. Proiectarea operațiilor de recuperare secundară

1. Principii generale.

a) *Studiul zăcămintului.* În cadrul unui proiect de recuperare secundară, în primul rînd se efectuează un studiu al caracterului zăcămintului, conform celor expuse la d. 1—4. Deoarece obiectul recuperării secundare îl formează zăcămintele care se află într-un stadiu avansat de epuizare, parametrii de exploatare din perioada de extracție prin erupție se vor analiza mai pe scurt. În schimb se va insista asupra parametrilor de exploatare, respectiv asupra proprietăților zăcămintului, din momentul în care se încep operațiile de recuperare secundară, în special asupra saturației în Țitei care constituie un factor determinant.

b) *Condițiile de aplicabilitate.* Deoarece rentabilitatea spălării stratului cu apă, cu gaze sau cu aer nu este asigurată decît în cazul cînd saturația lui cu Țitei depășește o valoare de ordinul a 40%, operațiile de recuperare secundară nu se execută la zăcămintele care, în perioada primară de exploatare au produs rațional în regimul cu împingere de apă sau în regimul de expansiune a zonei de gaze libere, fie că acest regim a fost natural, fie că a fost creat artificial printr-o operație de menținere a presiunii de zăcămint, care a dus la un coeficient de extracție mare.

În cazul injectării de apă, saturația cu apă a stratului nu trebuie să depășească o anumită valoare, pentru ca permeabilitatea efectivă față de agentul injectat să nu devină prea mare, dînd loc la canalizări (fig. 36, cap. VI). La începutul injectării, saturația cu apă a stratului nu trebuie să depășească circa 40%. Condiții analoge trebuie să existe și în cursul injectării unui agent gazos (gaze sau aer) (v. fig. 35, din Cap. VI) conform căreia saturația inițială de gaze nu trebuie să depășească 15%).

În general, pentru executarea operațiilor de recuperare secundară, drept condiții favorabile se consideră:

- o tectonică simplă a zăcămintului;
- o stratificare uniformă;
- o viscozitate mică a țițeiului în strat.

c) *Alegerea agentului motor.* Apa ca agent de injectare prezintă avantajul că este puțin costisitoare, avînd totodată o eficacitate de spălare mai mare decît gazele. În schimb, apa de injectare necesită tratament de condiționare și nu poate fi întrebuințată în straturi care conțin marne hidratabile.

Gazele se preferă în cazul cînd grosimea și permeabilitatea stratului sînt mai mari. Efectul gazelor este însă slab, cînd viscozitatea țițeiului este mare.

2. Spălarea stratului cu apă.

a) *Sistemele principale de amplasare a sondelor.* De obicei, cele două gabarite de sonde, gabaritul sondelor de injectie și gabaritul sondelor de reacție sînt aranjate astfel, încît

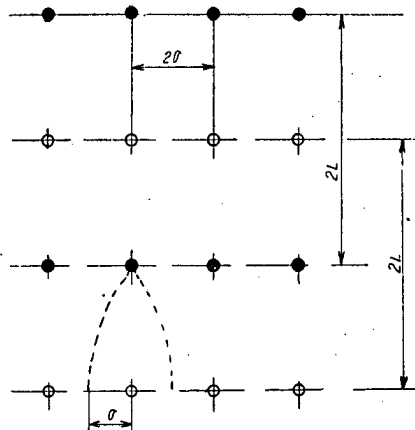


Fig. 69. Sistemul liniar de amplasare a sondelor la spălarea stratului cu apă. ○ — sonde de injectie; ● — sonde de reacție.

amplasamentele sondelor de injectie alternează cu cele ale sondelor de reacție.

Dintre sistemele de amplasare a sondelor cel mai mult se folosesc următoarele două:

1) *Sistemul liniar.* În acest sistem atît sondele de injectie cît și cele de reacție formează cîte un gabarit rectangular, identice ca distanțe, conform fig. 69.

Uneori se folosește și o variantă a sistemului liniar amplasîndu-se astfel gabaritele de sonde, încît cîte un rînd de sonde de injectie formează o linie în zig-zag cu rîndul vecin de sonde de reacție, cum se vede în fig. 70.

În sistemul liniar de amplasare a sondelor, raportul dintre numărul de sonde de injectie și numărul sondelor de reacție este egal cu 1.

Coefficientul de inundare I , este în funcție de raportul $\frac{L}{2\sigma}$ cum se vede în fig. 71.

în care:

2σ este distanța dintre sondele aceluiaș rînd;

L — distanța dintre un rînd de sonde de injectie și rîndul vecin de sonde de reacție;

I — coeficientul de inundare (v. Cap. II H.c.2.b) 2) și Cap. VI C.a.3.)

La aceeași valoare a parametrului $L/2\sigma$, coeficientul de inundare este, la aranjamentul

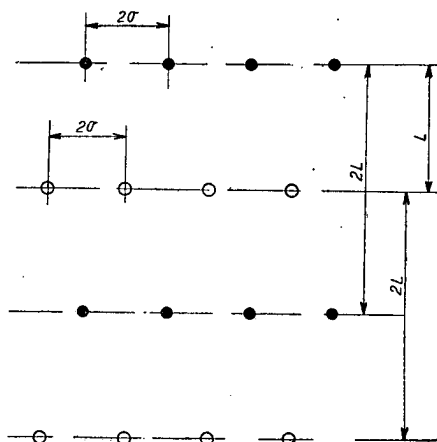


Fig. 70. Sistem liniar de amplasare cu sondele în zig-zag: ○ — sonde de injectie; ● — sonde de reacție.

în zig-zag mai mare decît la aranjamentul drept.

Coefficientul de extracție se stabilește în funcție de distanța medie dintre o sondă de

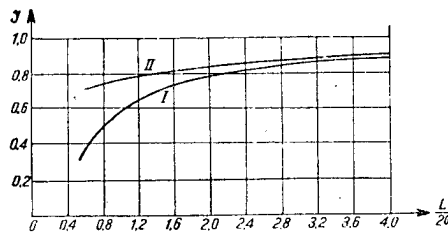


Fig. 71. Relația dintre coeficientul de inundare I și expresia $\frac{L}{2\sigma}$ pentru sistemul liniar de amplasare a sondelor: curba I: pentru amplasarea dreaptă; curba II: pentru amplasarea în zig-zag.

injectie și o sondă de reacție, cu ajutorul fig. 34 din Cap. VI). Drept distanță medie se introduce valoarea $\sqrt{\sigma L}$. Într-o rețea pătratică, în care $2\sigma = L$, distanța medie este egală cu $1,41 \sigma$.

2) *Sistemul în cinci puncte.* Sistemul de amplasare în cinci puncte este un caz special al sistemului liniar în zig-zag și anume, în cazul cînd cele două gabarite de sonde, cel de injectie și cel de reacție, sînt

pătratică, conform fig. 72, astfel încît $2\sigma = 2L$, respectiv $\sigma = L$.

În acest sistem, asupra fiecărei sonde de reacție acționează patru sonde de injecție, cum se vede în fig. 73, care reprezintă un element al sistemului care este format din cinci

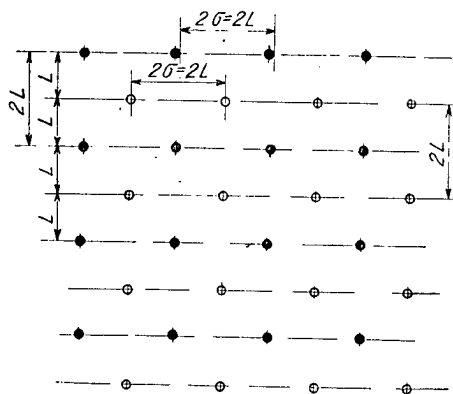


Fig. 72. Sistem de amplasare a sondelor în cinci puncte: ○ — sonde de injecție; ● — sonde de reacție.

sonde, de unde și numele sistemului «în cinci puncte».

Raportul dintre numărul de sonde de injecție și cel de sonde de reacție este egal cu 1, ca și la sistemul liniar. Coeficientul de inundare $I = 0,72$. Distanța medie dintre sonde (v. fig. 34 din Cap. VI) este egală cu σ .

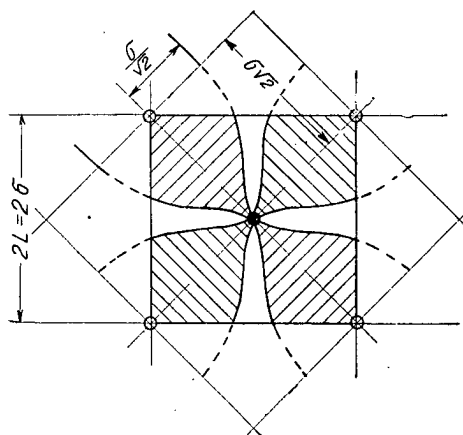


Fig. 73. Element din sistemul de amplasare în cinci puncte: ○ — sonde de injecție; ● — sonde de reacție. Porțiunile hășurate reprezintă suprafețele inundate ale elementului.

3) Alegerea sistemului de amplasare a sondelor. În cele mai multe cazuri gabaritul sondelor de reacție este stabilit în prealabil, deoarece proiectele de recuperare secundară privesc, de obicei, zăcămintele exploatate cu sonde existente

mai de mult. Deoarece poziția sondelor de reacție, respectiv a sondelor existente, determină în mare măsură și poziția sondelor de injecție, gabaritul acestora din urmă se stabilește în funcție de gabaritul sondelor existente.

În cazul cînd se impune să se folosească sonde noi de reacție, se preferă sistemul în cinci puncte care, la același număr de sonde, dă un coeficient de inundare mai mare (v. și Cap. II H.c.2.b) 2)).

Distanța dintre sondele de injecție se alege de ≤ 200 m.

b) Injecție de apă cu debit constant.

Pentru determinarea exactă a cantității de apă care urmează a se injecta printr-o sondă de injecție nu există relații analitice. Această problemă se rezolvă experimental, în fiecare caz aparte. La proiectarea operațiilor de recuperare secundară se socotește între 1,00 și 2,5 m³ de apă pe zi pentru fiecare metru de grosime a stratului, urmînd ca valoarea aleasă să fie verificată ulterior, în cursul operației. La strate cu permeabilitate neuniformă și mică se aleg valori apropiate de limita inferioară indicată anterior.

—Durata procesului de spălare. Durata primei perioade de spălare, adică de la începutul spălării printr-o sondă de injecție, pînă ce vârful frontului de apă ajunge la sonde de reacție a elementului respectiv al sistemului (v. cap. II. H. c. 2. b) 3) și cap. VI C.a. 3.), se determină cu ajutorul ecuației:

$$t_1 = \frac{F \cdot h \cdot m (1 - S_{a_0} - S_{t_0} + I S_{t_0} \varepsilon_1)}{q_i} \quad (146)$$

în care:

- t_1 este durata primei perioade de exploatare, în zile;
- F — suprafața unui element al sistemului în m²;
- h — grosimea stratului în m;
- m — porozitatea stratului (fracție);
- S_{a_0} — saturația cu apă a stratului, la începerea spălării (fracție);
- S_{t_0} — saturația cu țiței a stratului, la începerea spălării (fracție);
- I — coeficientul de inundare, caracteristic sistemului de amplasare aplicat;
- ε_1 — randamentul spălării (fracție), adică coeficientul de extracție atins în momentul inundării sondei, care se determină cu ajutorul diagramei din fig. 34 (cap. VI);
- q_i — debitul de injectare al unei sonde de injecție, în m³/zi.

Durata celei de a doua perioade de spălare începe la terminarea primei perioade și se termină cînd coeficientul de contaminare (impurificare) cu apă a lichidului extras a ajuns la o valoare care face procesul de spălare neeconomic.

Coeficientul de contaminare cu apă C_a , este definit prin ecuația:

$$C_a = \frac{q_a}{q_a + q_t} \quad (147)$$

în care:

q_a este debitul de apă și

q_t — debitul de țiței al sondelor de reacție.

Limita economică a gradului de contaminare variază între 0,90 și 0,98. Cu cât țițeiul extras are o valoare economică mai mare și cu cât cheltuielile de extracție sînt mai mici (sonde cu adîncime mică, intervenții puține) cu atît valoarea-limită a coeficientului de contaminare se apropie mai mult de limita ei superioară.

Durata celei de a doua perioade de spălare se determină cu ajutorul ecuației:

$$t_2 = \frac{F \cdot h \cdot m \cdot I \cdot S_{t_0} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) q_{sm}}{q_i} \quad (148)$$

în care:

t_2 este durata celei de a doua perioade de spălare, în zile;

$F \cdot h \cdot m \cdot I \cdot S_{t_0}$ — ca și în ecuația (146);

ε_2 — coeficientul de extracție final; valoarea lui se determină în funcție de coeficientul de contaminare C_a ales (v. fig. 6, cap. VI);

q_{sm} — consumul mediu specific de apă injectată, pe unitatea de țiței extrasă.

Valoarea consumului specific de apă este dată prin ecuația:

$$q_s = \frac{q_a + q_t}{q_t} \quad (149)$$

Combinînd ecuația (147) cu ecuația (149) se obține:

$$q_s = \frac{1}{1 - C_a} \quad (150)$$

La începutul celei de a doua perioade de spălare, coeficientul de impurificare C_a este egal cu 0, deci:

$$q_s = 1.$$

Dacă se presupune că consumul specific de apă crește liniar de la valoarea lui inițială pînă la valoarea lui finală, consumul specific mediu este media aritmetică a acestor două valori limită. Deci:

$$q_{sm} \cong \frac{1 + \frac{1}{1 - C_a}}{2} = \frac{2 - C_a}{2 - 2C_a} \quad (151)$$

c) *Injectia de apă cu presiunea diferențială constantă.*

Acest procedeu se aplică în special în cazurile cînd din cauza injectității mici a sondelor nu se poate menține un debit constant de injecție. Metoda de calcul vezi M. Muskat „Bazele fizice și tehnologia extracției de țiței”, Cap. IX Gostoptehizdat, 1953.

d) *Spălarea stratului de țiței printr-un singur front.* În zăcămintele la care stratul de țiței are o permeabilitate uniformă și o înclinare mai mare, ceea ce favorizează formarea unei separații nete între apă și țiței (datorită diferenței dintre greutatea specifică a acestor două fluide), spălarea țițeiului se poate face printr-un singur rînd de sonde, amplasate dincolo de conturul țiței-apă.

Un astfel de proiect de recuperare secundară se execută ca și un proiect de menținere a presiunii de zăcămint, prin injectarea de apă (v. Cap. VII B. f.). În acest caz, cantitatea apei de injectat se determină în funcție de debitul de țiței al zăcămintului, conform ecuației (127), fie de cel existent în momentul începerii operației, fie în funcție de alt debit (de obicei mai mare), care se impune zăcămintului, după care se determină numărul sondelor de injecție. În acest caz, durata exploatării se determină conform celor expuse în Cap. VII B. e.

Dacă zăcămintul are mai multe rînduri de sonde de reacție, după inundarea primului rînd de sonde, acestea se folosesc drept sonde de injecție în locul sondelor folosite inițial pentru injecție. La fel se procedează după inundarea celui de al doilea rînd și a următoarelor rînduri de sonde de reacție.

e) *Instalațiile necesare spălării cu apă a stratului.* În linii generale, instalațiile necesare unei operații de spălare a stratului cu apă sînt aceleași ca și la operațiile de menținere a presiunii de zăcămint.

De obicei sondele de reacție sînt alese dintre sondele existente; sonde noi se sapă numai pentru completarea gabaritului unde există lipsuri.

Avînd în vedere rentabilitatea mai mică a proiectelor de recuperare secundară, se aleg și pentru injecție, pe cît posibil, sonde vechi.

Se recomandă însă a se săpa în orice caz cîteva sonde noi, în vederea luării unor carote mecanice pentru stabilirea permeabilității și a compoziției granulometrice a stratului și, în special, pentru a culege informații referitoare la saturația lui actuală cu țiței și apă.

Ținînd seama de cele menționate și de numărul relativ mare de sonde care intră în cadrul unui proiect de recuperare secundară, operațiile de pregătire și de recondiționare a sondelor au un rol important.

Aceste operații constă de la caz la caz, din:

- repararea coloanelor de exploatare;
- curățirea sondelor;
- drenaje;
- acidizări;

— cimentări și perforări de strate, pentru a asigura o injectare uniformă în toate nisipurile care urmează a se spăla;

— pentru a putea injecta apa în mai multe strate în mod selectiv, se folosesc packere, atașate la țevile de extracție.

Capetele de injecție de la gura sondelor sînt de obicei de o construcție simplă, avînd în vedere cantitățile relativ mici care se injectează la presiune mică.

Din același motiv și instalațiile de suprafață pentru injectarea apei sînt mai simple decît la operațiile de menținere a presiunii de zăcămint. De asemenea, și tratarea apei se face mai sumar, în special la sondele puțin adînci, limitîndu-se uneori la curățirea ei mecanică, acolo unde este necesar.

3. Spălarea stratului cu gaze.

a) *Sistemele de amplasare a sondelor.* La operațiile de spălare a stratului cu gaze, raportul dintre numărul sondelor de injecție și numărul sondelor de reacție este mai mic decît la spălarea cu apă. Se folosește o sondă de injecție pentru trei pînă la opt sonde de reacție. Amplasarea sondelor de injecție se face de obicei, în funcție de sondele de reacție existente, fixîndu-se cite o sondă de injecție în mijlocul fiecărui grup mic de sonde de reacție. Acest sistem de amplasare a sondelor de injecție este deci, în principiu, intercontural, avînd însă un gabarit mai mult sau mai puțin neregulat.

Pentru strate cu înclinare mare și cu tectonica uniformă se folosește și sistemul de amplasare extracontural, fixînd sondele de injecție dincolo de conturul țitei-gaze într-un singur rînd, ca și la operațiile de menținere a presiunii de zăcămint și ca și la operațiile de spălare cu apă.

b) *Determinarea cantității gazelor de injectat.* Valorile optime ale cantităților de gaze care se injectează într-o sondă s-au stabilit empiric, deoarece lipsește o analiză cantitativă a procesului de spălare cu gaze.

În calculele de proiectare se introduc valori care variază pentru fiecare sondă de injecție între 100 și 150 m³/zi de fiecare metru de grosime de strat. Valoarea exactă a cantității de gaze care urmează a se injecta efectiv, se stabilește în fiecare caz aparte, pe cale experimentală, respectiv în cursul executării operației, pe baza urmăririi mersului ei. Drept cifră de control se folosește valoarea presiunii de injectare care nu trebuie să depășească presiunea stratului cu mai mult decît 20—25%.

În cazul injectării extraconturale de gaze într-un singur front, debitul inițial de injectare al gazelor se stabilește în funcție de debitul de țitei al zăcămintului conform ecuației (128). La acest sistem de injectare uneori se poate imprima zăcămintului un ritm mai intens de extracție, în special cînd înclinarea stratului petrolifer este mai mare. Numărul sondelor de injecție este egal cu raportul dintre cantitatea totală a gazelor de injectat

și cantitatea care se poate injecta printr-o singură sondă.

c) *Durata operației de spălare cu gaze.* La injectarea intraconturală, durata operației de spălare cu gaze se poate stabili cu ajutorul ecuației:

$$t = \frac{Q_j}{n_i g_i} \quad (152)$$

în care:

t este durata operației de spălare, în zile;

n_i — numărul sondelor de injecție;

g_i — cantitatea de gaze, care se injectează zilnic printr-o sondă, în m³N/zi;

Q_j — cantitatea totală de gaze care se injectează în strat.

Cantitatea totală de gaze Q_j , care se injectează în strat se poate stabili cu ajutorul ecuației:

$$Q_j = G_j (N_0 \epsilon - x_1) \quad (153)$$

în care:

N_0 este rezerva inițială de țitei în zăcămint în m³ cf. (3);

x_1 — cantitatea de țitei extrasă pînă la începutul spălării în m³;

ϵ — coeficientul de extracție final. Valoarea lui variază între 0,35 și 0,55, dintre care limita superioară se alege pentru țiteiuri cu viscozitate mică și pentru strate subțiri și uniforme;

G_j — rația de injectare, respectiv cantitatea de gaze injectată de fiecare m³ de țitei extras. Valoarea rației de injectare variază între 800 și 1 500 m³N gaze/m³ țitei; ea este cu atît mai mare, cu cit valoarea economică a țiteiului extras este mai mare și cu cit celelalte cheltuieli de extracție sînt mai mici.

La injectarea extraconturală de gaze, durata spălării se calculează în același mod ca și la operațiile de menținere a presiunii de zăcămint prin injectare de gaze (v. Cap. VII B. f. și e.).

d) *Instalațiile necesare spălării cu gaze a stratului.* Instalațiile necesare unei operații de spălare a stratului cu gaze sînt, în general, ca și la operațiile de menținere a presiunii de zăcămint, prin injectarea cu gaze.

Ca și la operațiile de spălare a stratului cu apă, un rol mare îl au operațiile de pregătire a sondelor de reacție și de injecție. Instalațiile de suprafață au dimensiunile și construcția corespunzătoare debitului și presiunii relativ joase la care se face injectarea de gaze.

4. Bazele economice ale proiectării operațiilor de recuperare secundară.

a) *Principiile generale.* Eficacitatea economică a operațiilor de recuperare secundară se stabilește printr-o comparație a indicilor tehnico-economici ai exploatării fără și cu executarea spălării stratului.

În acest scop se evaluează întîi producția viitoare a zăcămintului, adică din momentul

cind s-ar începe operația și până la limita de rentabilitate, atât în ipoteza continuării exploatarei — fără recuperare secundară — cât și în ipoteza aplicării acestei metode. Calculul se face ca și la operațiile de menținere a presiunii de zăcămint (v. capitolul VII B. f.). În cazul aplicării unei operații de spălare, drept coeficienți de extracție finali se iau pentru injectarea de apă: 50—80% și pentru injectarea de gaze 35—55%.

Apoi se calculează cei doi indici tehnico-economici principali ai exploatarei, productivitatea muncii și prețul de cost, atât în ipoteza continuării exploatarei fără recuperare, cât și în ipoteza aplicării acestei metode. Calculul în cea de a doua ipoteză se face uneori pentru mai multe variante de debit de injectare, respectiv timp de exploatare, în vederea găsirii unor valori optime ale indicilor tehnico-economici.

De obicei, drept criteriu principal al eficacității economice se consideră prețul de cost, iar valoarea productivității muncii servește drept cifră de control și de corecție, dacă este cazul.

b) *Productivitatea muncii.* Volumul de muncă necesară și productivitatea muncii se stabilesc conform celor expuse la B. g. În ipoteza aplicării operației de recuperare secundară trebuie să se țină seamă și de salariații ocupați cu captarea, injectarea și eventual tratarea agentului motor în instalațiile respective (de captare, pompare și eventual tratare).

La stabilirea productivității muncii se omite volumul de muncă necesar pentru forajul sondelor existente. În schimb, pentru ipoteza recuperării secundare trebuie adăugat volumul de muncă, necesar pentru pregătirea și recondiționarea acestor sonde.

În ce privește cifrele care reies din diagramele fig. 50, 51 și 52, respectiv din ecuațiile (134), (135) și (136), se impune o verificare a acestor valori, având în vedere că sondele vechi, cu producție mică (cum este cazul la recuperarea secundară), cer un personal de deservire mai puțin numeros. Ca primă aproximație, sondele de injecție, din punctul de vedere al personalului necesar, se includ în calcul ca și sondele de reacție.

c) *Prețul de cost.* În general prețul de cost se stabilește conform celor expuse la B. g., cu următoarele observații pentru ipoteza recuperării secundare:

— La cheltuielile de întreținere trebuie adăugate cheltuielile pentru captarea, injectarea și eventual tratarea agentului motor, cum și eventual cheltuielile legate de urmărirea și remedierea fenomenului de canalizare în strat a agentului motor.

În ce privește amortizarea investițiilor se va ține seama de amortizarea investițiilor pentru instalațiile de captarea, injectarea, transportul și eventual tratarea agentului motor cum și de cheltuielile necesare pentru forajul

sondelor noi, cum și de pregătirea și recondiționarea sondelor existente. Amortizarea cheltuielilor de foraj pentru sondele existente poate fi omisă în diferitele ipoteze de calcul. În schimb, amortizarea instalațiilor de suprafață existente se va introduce în calcul, cu valori corespunzătoare duratelor de exploatare, în fiecare ipoteză.

C. EXPLOATAREA RAȚIONALĂ A ZĂCĂMINTELOR DE GAZE

a. Calculul rezervei de gaze

1. *Metoda volumetrică.* După metoda volumetrică, rezerva unui zăcămint de gaze respectiv cantitatea de gaze care se află inițial în zăcămint, se poate calcula cu ajutorul ecuației:

$$V_0 = F \cdot h \cdot m \cdot S_{g0} \frac{1}{B_0} \quad (154)$$

în care:

- V_0 — rezerva de gaze în condiții normale, în m^3N ;
- F — suprafața zonei gazeifere în m^2 ;
- h — grosimea medie a zonei gazeifere în %;
- m — porozitatea medie a zonei gazeifere (fracțiune);
- S_{g0} — saturația inițială cu gaze a zonei (fracțiune);
- B_0 — coeficientul inițial de volum al gazelor.

Coeficientul inițial de volum al gazelor se stabilește cu ecuația:

$$B_0 = \frac{Z(t + 273)}{p_0 273} \quad (155)$$

dacă se consideră drept condiții normale temperatura de $0^\circ C$ și presiunea de 1 ata.

Dacă drept condiții normale se consideră temperatura de $20^\circ C$ (conform STAS, pentru condițiile tehnice) și presiunea de 1 ata, se folosește ecuația:

$$B_0 = \frac{Z(t + 273)}{p_0 293} \quad (156)$$

în ecuațiile (155) și (156) înseamnă că:

- t — este temperatura zăcămintului în $^\circ C$;
- p_0 — presiunea inițială a zăcămintului în ata;
- Z_0 — factorul de abatere al gazelor de la legile gazelor perfecte, în condițiile inițiale de presiune și temperatură. Având în vedere, că gazele zăcămintelor de gaze sînt constituite în majoritate din metan (în special în R.P.R. ele conțin peste 99% metan) valoarea factorului Z_0 al gazelor din zăcămintele de gaze se poate considera în general egală cu valoarea factorului Z al metanului.

Stabilirea grosimii și porozității medii a stratului se face cu ajutorul ecuațiilor (13), (15) și (16).

În locul valorii pentru saturația inițială cu gaze a zonei de gaze S_{g0} , pentru calculul rezervei se folosește uneori saturația cu apă remanentă S'_a . Între aceste două valori există relația:

$$S'_a + S_{g0} = 1. \quad (157)$$

Folosind și ecuația (156) pentru coeficientul de volum al gazelor, rezerva de gaze a unui zăcămint în condiții standard, este:

$$V_0 = Fhm(1 - S'_a) \frac{293}{Z_0(273 + t)} p_0 \quad (158)$$

Dacă în ecuația (158) se introduce expresia:

$$\Omega = V_0 B_0 = Fhm(1 - S'_a) \quad (159)$$

care reprezintă volumul spațiului de pori al zăcămintului, ocupat de gaze, ecuația rezervei de gaze se poate scrie astfel:

$$V_0 = \frac{293}{Z_0(t + 273)} \Omega p_0. \quad (160)$$

Deoarece la exploatarea zăcămintelor de gaze coeficientul final de extracție are valoarea aproximativ egală cu 1, ecuația (160) reprezintă aproximativ și rezerva extractibilă a unui zăcămint de gaze. O valoare mai apropiată de realitate se obține înlocuind în (160) pe p_0 prin $p_0 - p_r$, unde p_r este presiunea reziduală de abandonare apropiată de 1 ata.

2. Metoda declinului de presiune. Ecuația (160) este valabilă și sub forma:

$$V_t = \frac{293}{Z_t(t + 273)} \Omega p_t \quad (161)$$

în care:

V_t este cantitatea de gaze în condiții standard care se află în zăcămint la un moment dat (t), în m^3N ;

p_t — presiunea zăcămintului în același moment, în ata;

Z_t — factorul de abatere al gazelor, în condițiile momentului dat.

Dacă nu se cunoaște geometria zăcămintului de țiței, respectiv valoarea lui Ω , cu ajutorul ecuației (161) se poate scrie pentru un moment dat, relația:

$$V_t = V_0 - V_e \quad (162)$$

în care:

V_e este cantitatea de gaze, extrasă cumulativ din zăcămint, până la acel moment dat, cunoscută din înregistrările de producție.

Cu ajutorul ecuațiilor (160), (161) și (162) și presupunând că, în timpul exploatării, volumul zonei de gaze și temperatura zăcămintului rămân constante, se obține ecuația:

$$V_0 = V_e \frac{p_0 Z_t}{p_0 Z_t - p_t Z_0} \quad (163)$$

În cazul cînd scăderea presiunii $p_0 - p_t$, în intervalul considerat nu este mare, se poate scrie:

$$Z \cong Z_0$$

și ecuația (163) ia forma:

$$V_0 \cong V_e \frac{p_0}{p_0 - p_t} \quad (164)$$

b. Bazele hidrodinamice ale exploatării zăcămintelor de gaze

1. Condițiile de epuizare ale zăcămintelor de gaze. Caracterizarea condițiilor de epuizare ale zăcămintelor de gaze se poate face prin stabilirea variației presiunii zăcămintului, în decursul exploatării, în funcție de timpul de exploatare, respectiv de cantitatea de gaze extrase.

Dacă în ecuația (161) se consideră:

$$\frac{293}{Z(t + 273)} \cong 1 \quad (165)$$

se poate scrie ecuația:

$$\Omega p - Q_g dt = (\Omega + d\Omega)(p + dp) \quad (166)$$

în care:

Q_g este debitul zăcămintului la un moment dat, în m^3N/zi ;

dt — diferențiala timpului în zile;

dp — micșorarea presiunii zăcămintului, în urma extracției cantității de gaze Qdt , exprimată adimensional față de atmosfera standard;

$d\Omega$ — micșorarea spațiului de pori, ocupat cu gaze (în urma avansării apei de zăcămint, în m^3).

Dacă în intervalul de timp considerat Ω rămîne constant, din ecuația (166) se obține:

$$Q_g dt = - \Omega dp. \quad (167)$$

Integrînd această ecuație, se obține:

$$\int_0^t Q_g dt = V_e = \Omega (p_0 - p_t) \quad (168)$$

în care:

V_e este cantitatea de gaze extrasă cumulativ de la începutul exploatării ($t = 0$), până în momentul t , în m^3N ;

p_0 — presiunea inițială a zăcămintului } presiuni absolute, adimensionale, în raport cu atmosfera standard.

p — presiunea zăcămintului în momentul t

Din ecuația (168) urmează că:

$$p = p_0 - \frac{V_e}{\Omega}. \quad (169)$$

Ecuațiile (168) și (169) sînt valabile indiferent de ritmul de extracție și de sistemul de ampla-

sare a sondelor, atît timp cît volumul spațiului de pori ocupat de gaze nu variază.

Ecuția (169) enunță că presiunea unui zăcămint de gaze p , este o funcție liniară de cantitatea de gaze V_e , extrase cumulativ.

2. Regimurile zăcămintelor de gaze.

a) *Generalități.* Purtătorii principali de energie, care contribuie la mișcarea gazelor prin strat și prin găurile sondelor, sînt chiar gazele și apa de zăcămint. Dintre acestea, gazele acționează prin energia lor de compresiune și apa, fie prin energia ei de compresiune care se manifestă cînd are un volum mare, fie prin energia ei potențială de gravitație, în cazul cînd apa afloarează la suprafață, formînd un zăcămint deschis (v. fig. 20).

Față de acești purtători și față de aceste forme de energie, ceilalți purtători și celelalte forme de energie au un rol cu totul neînsemnat cum ar fi: roca drept purtător de energie de compresiune (neglijabilă în comparație cu energia de compresiune a gazelor); de asemenea gazele ca purtător de energie potențială de gravitație, greutatea specifică a acestora fiind relativ mică (circa 1‰ din greutatea țîțeiului la 1 ata, respectiv circa 10% cea la presiunea de 100 ata).

În lumina celor expuse la zăcămintele de gaze se deosebesc următoarele regimuri:

b) *Regimul cu împingere de apă.* Regimul cu împingere de apă sau, pe scurt, regimul hidraulic se caracterizează esențial prin faptul că, în cursul extracției gazelor, ritmul de înaintare a apei în zona gazeiferă este astfel, încît presiunea zăcămintului rămîne tot timpul constantă, ceea ce are loc prin micșorarea continuă a spațiului de pori ocupat de gaze. Existența acestui regim este condiționată de:

— o apă de zăcămint deschisă și alimentată continuu de la suprafață sau o apă de zăcămint închisă, de proporții mari;

— o permeabilitate destul de mare a rocii colectoare;

— un ritm de extracție care nu depășește posibilitățile de înaintare a apei în zona de gaze, înaintare a cărei viteză variază de obicei între 16 și 64 m/an.

c) *Regimul de expansiune a gazelor.* Regimul de expansiune a gazelor (uneori numit pe scurt regimul gazos), se caracterizează prin faptul că mișcarea gazelor se produce exclusiv datorită expansiunii gazelor, fără a se produce o înaintare a apei în zona de gaze. Deci, presiunea zăcămintului scade continuu în cursul extracției și constanța volumului spațiului de pori ocupat de gaze constituie un criteriu esențial al acestui regim. În realitate, datorită scăderii presiunii în cursul extracției, spațiul de pori ocupat de gaze se micșorează din cauza expansiunii grăunțelor rocii iar gazele care ies din soluție din apă caută să mărească într-o mică măsură spațiul zonei de gaze. Avînd în vedere atît compresibilitatea mică a rocii cît și solubilitatea mică a metanului în apă (circa

0,05 m³ gaze pe m³ apă și atmosferă), în calculele curente se neglijează influența acestor doi factori.

d) *Regimurile mixte.* În practica exploatării zăcămintelor de gaze, regimul hidraulic se întîlnește rar, pentru că ritmul de extracție depășește de obicei posibilitățile de înaintare a apei. De aceea chiar în cazul existenței unei ape active de zăcămint, regimul de zăcămint este în majoritatea cazurilor un regim mixt, fiind caracterizat printr-o scădere mai mult sau mai puțin lentă a presiunii și a spațiului de pori ocupat de gaze.

Folosirea ecuației (168) din care reiese că:

$$\Omega = \frac{V_e}{p_0 - p_t} \quad (170)$$

oferă posibilitatea să se aprecieze în ce măsură un regim de zăcămint se apropie mai mult de regimul hidraulic sau de regimul expansiunii gazelor și anume, în felul următor:

Dacă se cunosc în mai multe momente ale exploatării presiunile de zăcămint p_1, p_2, p_3 și cantitățile corespunzătoare de gaze extrase cumulativ, V_{e1}, V_{e2}, V_{e3} , se pot scrie ecuațiile:

$$\Omega_1 = \frac{V_{e1}}{p_0 - p_1}; \quad \Omega_2 = \frac{V_{e2}}{p_0 - p_2}$$

$$\Omega_3 = \frac{V_{e3}}{p_0 - p_3}$$

Dacă valorile pentru Ω stabilite de ecuațiile de mai sus satisfac condiția:

$$\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3 = \dots,$$

regimul zăcămintului este regimul de expansiune a gazelor.

Dacă însă

$$\Omega_1 \neq \Omega_2 \neq \Omega_3 \quad (172)$$

regimul zăcămintului este fie mixt, fie hidraulic, în funcție de mărimea diferențelor care există între valorile Ω_1 respectiv Ω_2 , respectiv Ω_3 .

3. Amplasarea sondelor.

a) *Amplasarea uniformă.* La sistemul de amplasare uniformă, sondele sînt distribuite uniform pe suprafața gazeiferă, după un gabarit triunghiular, pătratic, etc. Din punctul de vedere al gazodinamicii subterane, forma gabariturii nu are influență asupra rezultatelor extracției. Din punctul de vedere al exploatării se preferă gabaritul pătratic, el fiind cel mai convenabil.

La zăcămintele cu apă activă, sondele exterioare se așează la o distanță de minimum 600 m de la conturul gaze-apă, pentru a da acestor sonde posibilitatea să producă timp de minimum zece ani presupunîndu-se că viteza de avansare a apei în strat este de maximum 60 m pe an. La zăcămintele la care grosimea zonei gazeifere are variații mari, se permit abatări

de la forma strict pătratică a gabaritului de sonde, prin faptul că în zonele cu grosime mare, rețeaua sondelor se face mai deasă.

La un gabarit pătratic, distanța dintre sonde se determină cu ecuația:

$$2\sigma = \sqrt{\frac{F}{n}} \quad (173)$$

în care:

2σ este distanța dintre sonde, în m;

F — suprafața gazeiferă, în m^2 ;

n — numărul de sonde din gabarit.

b) *Amplasarea în baterie.* La sistemul de amplasare în baterie, sondele se așază într-un singur rînd (baterie), în centrul suprafeței gazeifere. Forma rîndului este circulară, ovală

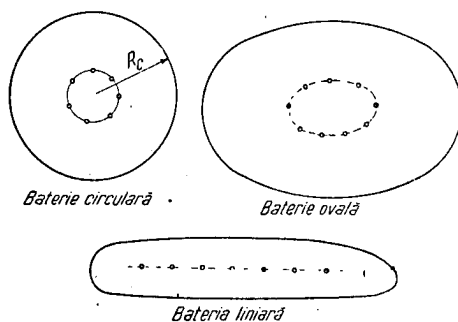


Fig. 74. Amplasarea sondelor de gaze în baterie.

sau liniară, după cum este forma suprafeței gazeifere, circulară, respectiv ovală, respectiv liniară (fig. 74).

La zăcămintele circulare, diametrul bateriei se alege de 1 000 pînă la 2 000 m și distanța dintre sonde între 80 și 200 m. Distanța dintre sonde 2σ , se determină cu ecuația:

$$2\sigma = \frac{2\pi r_b}{n} \quad (174)$$

în care:

r_b este raza bateriei;

n — numărul de sonde ale bateriei.

c) *Alegerea sistemului de amplasare.* Cantitatea totală de gaze care se poate extrage dintr-un zăcămint, nu depinde de sistemul de amplasare a sondelor. În schimb, sistemul de amplasare influențează numărul sondelor și ritmul de extracție. Avînd același număr de sonde la sistemul uniform, ritmul de extracție este mai rapid decît la amplasarea în baterie, la care distanța pe care o parcurge gazele prin strat este mai mare.

Diferența dintre debitele care rezultă la cele două sisteme de amplasare nu este însă mare (sub 10%) cînd cantitatea de gaze extrasă anual nu depășește 4—5% din rezerva totală a zăcămintului.

Sistemul de amplasare uniform cuprinde mai bine totalitatea suprafeței gazeifere ceea ce este important la zăcămintele neuniform dezvoltate,

respectiv afectate de accidente tectonice sau de sedimentare.

La zăcămintele cu ape active, în cazul amplasării uniforme a sondelor, se produce o inundare a acestora, începînd cu sondele exterioare și avînsînd continuu spre interiorul zăcămintelor, ceea ce înseamnă o pierdere prematură a unei părți a investițiilor de foraj. La amplasarea în baterie, toate sondele produc pînă aproape de epuizarea zăcămintului.

Amplasarea sondelor în baterie mai prezintă următoarele avantaje de ordin economic:

- Concentrarea activității de foraj pe o suprafață relativ mică. Aceasta permite: aplicarea metodei avansate de foraj în cuib; centralizarea manipulării noroiului de foraj; ușurarea condițiilor de aprovizionare a sondelor cu materiale, a construirii drumurilor de acces, a conducerii tehnice, etc.

- Concentrarea activității de extracție pe o suprafață relativ mică, ceea ce permite înlesnirea deservirii sondelor, eventual și amortizarea unora dintre operații.

- Reducerea rețelei de conducte pentru colectarea gazelor.

- Posibilitatea folosirii centralizate a surplusului de presiune a gazelor.

- Conservarea unei părți mai mari a suprafeței zăcămintului pentru agricultură sau în alte scopuri.

Din cele expuse rezultă că amplasarea sondelor în baterie este de preferat la zăcămintele care nu sînt afectate de accidente tectonice și cînd planul de producție nu prevede un ritm de extracție prea intensiv.

4. Regimul tehnologic al sondelor.

a) *Curgerea radială a gazelor în strat, spre sonde.* La curgerea radială și laminară spre sonde a gazelor prin strat, debitul unei sonde se determină prin ecuația:

$$q = \frac{\pi k h (p_a^2 - p_s^2)}{p_a \cdot \mu_g \cdot \ln \frac{r_e}{r_s}} \varphi_s \quad (175)$$

în care:

q este debitul sondei;

k — permeabilitatea;

h — grosimea stratului;

p_a — presiunea atmosferică;

μ_g — viscozitatea gazelor;

r_e — raza zonei de drenaj, care se ia egală cu jumătatea distanței dintre sonde (la amplasarea uniformă);

r_s — raza sondei;

p_e — presiunea zăcămintului la marginea exterioară a zonei de drenaj;

p_s — presiunea dinamică de fund a sondei;

φ_s — factorul de imperfecție al sondei (v. cap. Hidraulica subterană).

Dacă în ecuația (175) se introduc: permeabilitatea în darcy; grosimea stratului în m; presiunile în ata; viscozitatea în cP și razele

r_e , respectiv r_s , în orice unități de măsură, se obține debitul sondei în m^3n pe 24 ore, cu ajutorul ecuației:

$$q = \frac{11,75 kh (p_e^2 - p_s^2)}{\mu_g \log (r_e/r_s)} \varphi_s \quad (176)$$

Ecuația (175) respectiv (176) poate avea și forma:

$$q = A (p_e^2 - p_s^2) \quad (177)$$

în care A este, pentru fiecare sondă, o constantă egală cu

$$A = \frac{\pi kh \varphi_s}{p_a \mu_g \ln (r_e/r_s)} \quad (178)$$

respectiv

$$A = \frac{11,75 kh \varphi_s}{\mu_g \log (r_e/r_s)} \quad (178')$$

Într-un sistem de coordonate logaritmice, în care se trece $\log q$ pe axa absciselor și

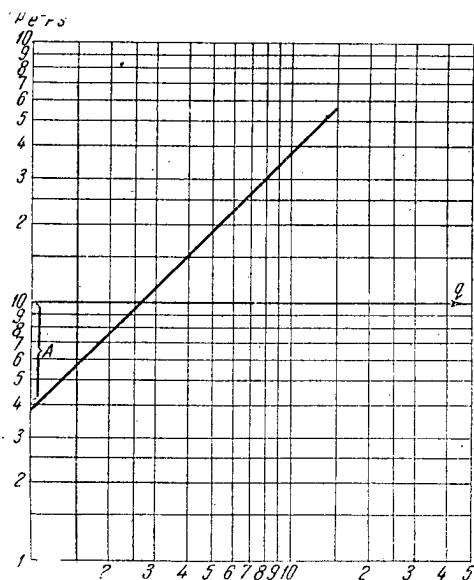


Fig. 75. Relația dintre debit și presiuni la sondele de gaze, cu curgerea laminară în strat.

$\log (p_e^2 - p_s^2)$ pe axa ordonatelor, ecuația (177) este reprezentată printr-o linie dreaptă, cu înclinare de 45% față de axa ordonatelor; linia taie axa ordonatelor la distanța $\log A$ de la originea sistemului de coordonate (v. fig. 75).

La debitele mari, curgerea gazelor prin strat spre sonde devine turbulentă. În aceste condiții valoarea debitului rezultă din ecuația:

$$q = A (p_e^2 - p_s^2)^m \quad (179)$$

în care exponentul m variază, de obicei, între 0,5 și 1,0, în funcție de debit. Într-un sistem de coordonate logaritmice, ecuația (179) pentru debite mari este reprezentată printr-o linie curbă (v. fig. 76).

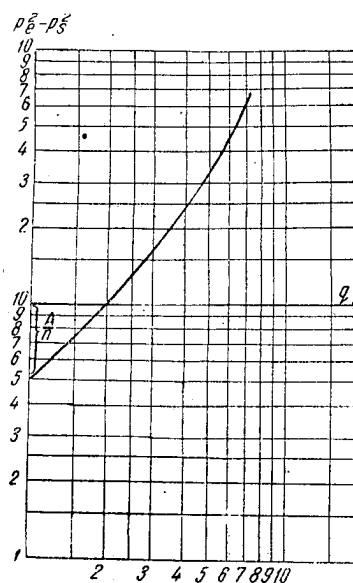


Fig. 76. Relația dintre debit și presiuni la sondele de gaze, cu curgerea turbulentă în strat.

Presiunea zăcămintului la marginea zonei de drenaj, p_e este practic egală cu presiunea de fund stabilizată a sondei închise. Determinarea acestei presiuni se face fie prin măsurători directe cu manometrul de fund, fie deducându-se presiunea stabilizată la suprafața a sondei închise în primă aproximație cu ajutorul ecuației:

$$p_e = p_i \exp (1,293 \cdot 10^{-4} \cdot H \cdot \delta) \quad (180)$$

în care:

p_i este presiunea stabilizată a sondei închise la suprafață, în ata;

e — baza logaritmilor naturali;

H — adâncimea fundului sondei, în m;

δ — densitatea relativă a gazelor față de aer.

Presiunea de fund dinamică a sondei se determină în mod analog, fie prin măsurări directe cu manometrul de fund, fie deducându-se din presiunea la gura sondei, în spațiul dintre coloana de exploatare și țevile de extracție (presupunind că extracția gazelor se face prin țevile de extracție), în primă aproximație, cu ajutorul ecuației:

$$p_s = p_g \exp (1,293 \cdot 10^{-4} \cdot H \cdot \delta) \quad (181)$$

în care:

p_g este presiunea la gura sondei, în spațiul prin care nu se extrag gazele.

b) Fixarea debitului sondelor de gaze.

1) Metoda debitului liber. Prin debit liber sau potențial absolut al unei sonde de gaze se înțelege, în mod convențional, debitul determinat cu ecuația:

$$q = A(p_e^2 - 1) \cong Ap_e^2 \quad (182)$$

În realitate, acest debit — pe care l-ar avea o sondă dacă presiunea ei dinamică de fund ar fi cea atmosferică (1 ata) — nu se poate obține, din cauza pierderilor de presiune care există în coloana ascendentă de gaze în sondă. Din punct de vedere hidrodinamic, expresia din ecuația (182) pentru debitul liber nu este de altfel corectă, în majoritatea cazurilor, și pentru motivul pentru că la un debit de extracție din gama debitului liber, cantitățile de gaze extrase în unitatea de timp sînt de obicei mari, deci curgerea în strat a gazelor nu mai este liniară și nu se conformează ecuației (177) din care s-a dedus valoarea debitului liber.

La metoda debitului liber, debitul curent al sondelor de gaze se stabilește cu formula:

$$q = \alpha q_l \quad (183)$$

în care α este un coeficient subunitar, coeficientul de solicitare care variază între 0,08 și 0,80. Stabilirea valorii coeficientului de solicitare pentru fiecare sondă nu se face pe bază de criterii științifice, ci prin aprecierea bazată pe experiența practică, după care, la sondele noi cu presiune inițială mare — se aleg pentru α , valori în jurul limitei inferioare, indicate anterior. Cu cît presiunea inițială a unei sonde este mai mică, sau cu cît stadiul ei de epuizare înaintază, se alege pentru coeficientul α o valoare din ce în ce mai mare.

Din ecuațiile (177) și (183) pentru curgerea laminară a gazelor, reiese:

$$A(p_e^2 - p_s^2) = Ap_e^2$$

Împărțind ecuația precedentă prin Ap_e^2 și introducînd expresia:

$$\varepsilon = \frac{p_s}{p_e} \quad (184)$$

se obține:

$$1 - \varepsilon^2 = \alpha \quad (185)$$

în care:

$\varepsilon = p_s/p_e$, reprezintă coeficientul depresiunii.

Într-un sistem de coordonate ortogonal, ecuația (185) este reprezentată printr-o parabolă (v. fig. 77).

În general, unui anumit regim de curgere (filtrație) în strat, îi corespunde o anumită relație între coeficientul depresiunii și coeficientul de solicitare α , reprezentată printr-o curbă, numită curbă caracteristică. Această curbă, caracteristică pentru curgerea laminară este o parabolă, conform ecuației (185).

2) Metoda vitezei-limită de filtrație. La această metodă preconizată de B. B. Lapuk, debitul unei sonde de gaze se stabilește, respectîndu-se principiul: viteza de filtrație a gazelor în jurul găurii de sondă să nu depășească limita la care acestea exercită

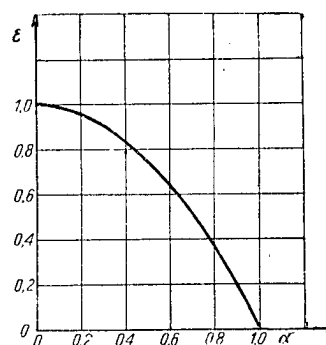


Fig. 77. Relația dintre coeficientul de solicitare α și coeficientul depresiunii ε (curba caracteristică).

un efect distructiv asupra rocii, antrenînd cu ele grăunți de nisip și alte impurități.

La o sondă cu dimensiuni anumite ale găurii și la anumite proprietăți fizice ale stratului, viteza de filtrație este direct proporțională cu expresia q/p_s , în care q este debitul și p_s presiunea dinamică de fund a sondei. Bazat pe acest fapt, Lapuk a dedus următoarea formulă simplă, pentru fixarea debitului sondelor de gaze:

$$q = cp_s \quad (186)$$

în care c este coeficientul de viteză *).

Coeficientul de viteză se stabilește experimental pentru fiecare sondă în parte, în felul următor: după ce o sondă intrată în producție s-a curățit de impuritățile provenite din noroiul de foraj și a intrat în regim normal de producție, se execută la ce o serie de probe cu ajutorul unui dispozitiv special de producție. Acest dispozitiv în forma lui cea mai simplă este cel reprezentat în fig. 78. În prelungirea brațului de ieșire a gazelor de la capul de erupție al sondei se instalează un burlan 3 de 8—12 țoli diametru și în fața lui un ecran confecționat din scinduri 5, pe care se fixează o coală de hîrtie albă 6. Cu ajutorul duzei 2 se stabilește un anumit debit al sondei, care se măsoară cu ajutorul tubului Pitot 4. Totodată se măsoară și presiunea la gura sondei în spațiul închis, cu ajutorul manometrului 1. Acest procedeu se repetă mărind mereu duza pînă ce gazele încep să aducă impurități, ceea ce se cunoaște

*) Cu aproximația admisă la deducere a formulei (186), că $T/T_0 \cong 1$, v (165), coeficientul c reprezintă chiar debitul volum în condițiile de presiune și temperatura din strat (p_s fiind exprimat adimensional, față de atmosfera standard).

cînd hîrtia fixată pe ecran se murdărește. Din debitul și presiunea în spațiul închis stabilite în acest punct, se calculează valoarea coeficientului de viteză, folosindu-se ecuația (186): în care:

$$\bar{c} = \frac{\bar{q}}{p_s} \quad (187)$$

în care:

\bar{q} este debitul-limită la care sonda începe a produce cu impurități în m^3n/zi ;

p_s — presiunea corespunzătoare dinamică de fund în ăta, care se calculează cu ecuația(181):

$$p_s = p_g \exp(1,293 \cdot 10^{-4} H \delta);$$

c — coeficientul-limită de viteză în $m^3n/zi \cdot at$.

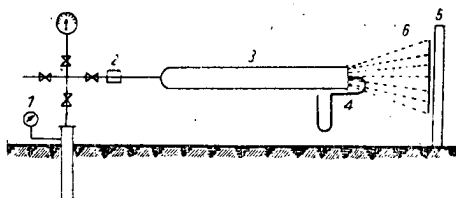


Fig. 78. Schema de instalație pentru încercarea sondelor de gaze.

Practic se ia un coeficient de viteză puțin mai mic:

$$c \approx 0,9 \bar{c} \quad (188)$$

care se menține constant pe toată durata de exploatare a sondei, al cărei debit se reglează corespunzător cu ecuația (186):

$$q = c p_s.$$

Metoda vitezei-limită de filtrație pentru fixarea debitului sondelor de gaze se bazează deci pe un criteriu fizic, real. Prin aplicarea acestei metode se folosesc, din plin, posibilitățile de producție ale sondelor; prin urmare, această metodă poate fi numită rațională.

În comparație cu metoda debitului liber, aplicarea metodei vitezei-limită de filtrație duce, în general, la fixarea unor debite mai mari ale sondelor. De aici rezultă un număr mic de sonde, necesare pentru a obține un anumit ritm de extracție pe zăcămint, deci o micșorare a investițiilor și a prețului de cost.

5. Distribuția presiunii în zăcămintele de gaze. La curgerea radială a gazelor spre o sondă, distribuția presiunii în jurul acesteia se poate determina cu ajutorul ecuației:

$$\frac{p^2 - p_s^2}{p_e^2 - p_s^2} = \frac{\ln \frac{r}{r_s}}{\ln \frac{r_e}{r_s}} \quad (189)$$

care dă presiunea p la distanța r de la centrul găurii sondei, în funcție de această distanță.

Tabela 17 indică presiunea în strat, în funcție de distanța de la o sondă, în următoarele condiții:

$$\begin{aligned} p_e &= 60 \text{ ata;} \\ p_s &= 57 \text{ ata;} \\ r_e &= 400 \text{ m (corespunzînd unei distanțe între sonde de 800 m);} \\ r_s &= 0,1 \text{ m.} \end{aligned}$$

Tabela 17. Variația presiunii în strat, cu distanța dela sondă

=	1	5	10	20	50 m
=	57,9	58,4	58,7	59,0	59,3 ata

Depresiunea totală, în acest caz:

$$\Delta p = p_e - p_s = 3 \text{ at,}$$

are pentru sondele de gaze o valoare relativ mare. Totuși, analiza cifrelor din tabelă arată că cea mai mare parte a depresiunii se consumă pentru mișcarea gazelor în imediata apropiere a sondei. De exemplu, pentru mișcarea gazelor de la 20 m distanță pînă la gaura sondei, se consumă:

$$\frac{59 - 57}{60 - 57} \approx 0,67$$

respectiv 67% din depresiunea totală. Pentru mișcarea gazelor de la 100 m distanță pînă la gaura sondei, se consumă chiar 83% din depresiunea totală.

De aici se poate trage concluzia că «pîlile de depresiune» în jurul găurilor de sonde ocupă un spațiu relativ mic în zăcămint și deci nu influențează mult valoarea presiunii medii pe tot zăcămintul (v. fig. 79).

Din aceste motive, pentru presiunea medie în zăcămint în calculele practice se introduce valoarea presiunii p_e de la raza conturului zonei de drenaj a sondelor, deoarece eroarea la rezultatele obținute rămîne sub 1%.

Valoarea absolută a depresiunii

$$\Delta p = p_e - p_s$$

se poate prezenta și sub forma următoare:

Egalînd părțile din dreapta ale ecuațiilor (177) și (186)

$$q = A (p_e^2 - p_s^2) = c p_s$$

și rezolvînd ecuația precedentă față de p_s , se obține:

$$p_s = \frac{c}{2A} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2A}{c} \right)^2 p_e^2} - 1 \right] \quad (190)$$

În cazurile cînd

$$\frac{2A}{c} p_e > 10 \quad (191)$$

în expresia de sub radical, valoarea 1 se poate neglija față de valoarea $(2p_e A/c)^2$ și forma ecuației (190) se simplifică astfel:

$$p_s \approx p_e - \frac{c}{2A}$$

din care rezultă:

$$\Delta p = p_e - p_s \approx \frac{c}{2A} \quad (192)$$

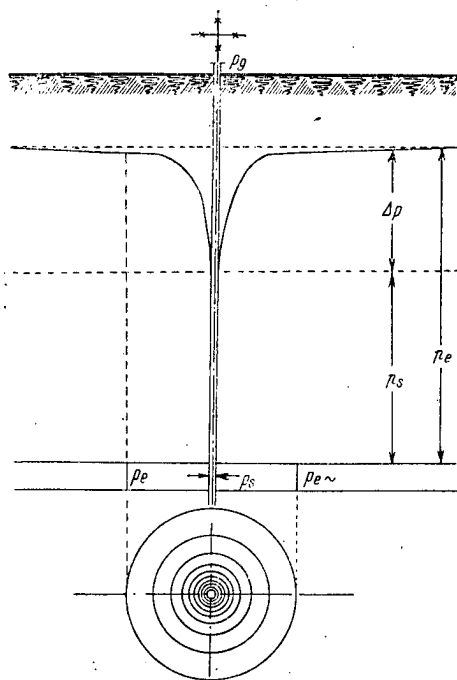


Fig. 79. Schema distribuției presiunii în strat, în jurul găurii de sondă.

Ecuația (192) enunță că, în cazul curgerii radiale și al regimului tehnologic al sondelor stabilit după metoda vitezei-limită de filtrație, depresiunea sondelor în producție rămâne constantă, atât timp cât presiunea zăcămintului se menține deasupra unei anumite valori minime, care se determină cu formula (191); în practică, această valoare minimă a presiunii de zăcămint este relativ mică, deci ecuația (192) este valabilă pentru o parte foarte mare din durata exploatării. Valoarea acestei depresiuni, Δp , se determină cu ajutorul măsurărilor care se fac la fiecare sondă nouă în producție, în scopul stabilirii coeficientului-limită de viteză, c . După ce presiunea zăcămintului a scăzut sub valoarea determinată prin formula (191) valoarea lui Δp scade, devenind egală cu zero la sfârșitul exploatării.

Exemplul 1. Un zăcămint de gaze are următoarele caracteristice:

Grosimea stratului	$h = 10$ m,
permeabilitatea stratului	$k = 300$ mD,
viscozitatea gazelor	$\mu_g = 0,0125$ cP,
greutatea specifică relativă a gazelor față de aer	$\delta = 0,6$
presiunea inițială de zăcămint	$p_0 = 56,1$ ata,
raza găurilor de sonde	$r_s = 0,075$ m,
distanța dintre sonde la amplasarea uniformă	$2\sigma = 1,00$ km (estimat în prealabil)

debitul inițial al unei sonde, fără a scoate impurități	$q = 52\ 200$ m ³ n/zi,
presiunea inițială la gura sondei, în spațiul închis	$p_g = 52,1$ ata,
adâncimea stratului	$H = 650$ m
coeficientul de imperfecție al sondelor	$\Phi_s = 0,5$

Se va stabili presiunea zăcămintului pînă la care depresiunea $\Delta p = p_e - p_s$ rămîne aproximativ constantă.

Conform ecuației (181):

$$p_s = p_g \exp(1,293 \cdot 10^{-4} H \delta) = 52,1 \cdot e^{1,293 \cdot 0,650 \cdot 0,6} = 54,8 \text{ ata.}$$

Conform ecuației (186):

$$c = \frac{q}{p_s} = \frac{52\ 200}{54,8} = 952 \text{ m}^3 \text{N/zi} \cdot \text{at.}$$

Conform ecuației (178):

$$A = \frac{11,75 \cdot k h \Phi_s}{\mu_g \log(r_e/r_s)} = \frac{11,75 \cdot 0,3 \cdot 10 \cdot 0,5}{0,0125 \lg 500/0,075} = 358$$

Pentru r_e s-a introdus jumătatea distanței dintre sonde, σ .

Conform ecuației (192);

$$\Delta p = p_e - p_s = p_0 - p_1 = \frac{952}{2 \cdot 358} = 1,327$$

Această depresiune rămîne constantă atît timp cît conform ecuației (191)

$$\frac{2A}{c} p_e > 10$$

$$\frac{1}{1,33} p > 10$$

respectiv:

$$p_e > 13,3 \text{ ata.}$$

Cele expuse anterior în legătură cu distribuția presiunii în strat, la curgerea radială a gazelor spre sonde, sînt strict valabile numai la amplasarea uniformă a sondelor pe zona gazeiferă a zăcămintului. La zăcămintele cu amplasarea sondelor în baterie, curgerea gazelor numai este pur radială; la zăcămintele circulare, ea poate fi considerată compusă dintr-o curgere liniară și una radială. Expe

riența însă dovedește că cel puțin depresiunea la zăcămintele circulare sau aproximativ circulare, care reprezintă majoritatea zăcămintelor de gaze din R.P.R., este constantă în timpul exploatării, ca și la amplasarea uniformă, în sensul că diferența dintre presiunea de contur și presiunea dinamică de fund a sondelor nu se schimbă, în cazul exploatării, decit spre sfârșitul ei. Singura deosebire este că valoarea lui Δp este mai mare la amplasarea în baterie decit la amplasarea uniformă. În general, valorile depresiunii variază între 0,3 și 3 at și anume, în jurul limitei inferioare la amplasarea uniformă și în jurul limitei superioare la amplasarea în baterie.

Urmărirea presiunii de zăcămintă se poate face foarte bine cu ajutorul unei (sau al mai multor) sonde piezometrice, amplasate în puncte potrivite.

6. Ritmul de extracție la zăcămintele de gaze.

a) *Principiile generale.* În decursul exploatării, presiunea unui zăcămintă de gaze scade în continuu, iar relația între cantitatea de gaze extrase până la acest moment este dată prin ecuația (169):

$$p = p_0 - \frac{V_e}{\Omega}$$

în care:

- p este presiunea zăcămintului, la un moment dat;
- p_0 — presiunea inițială a zăcămintului;
- Ω — volumul spațiului de pori ocupat de gaze, conform ecuației (159) considerat constant;
- V_e — cantitatea de gaze extrasă cumulativ până la momentul dat.

Dacă debitul sondelor se stabilește pe baza ecuației (186) în care, conform ecuației (192):

$$p_s = p_e - \frac{c}{2A} \quad (193)$$

pentru debitul unei sonde se obține relația:

$$q = c \left[p_e - \frac{c}{2A} \right] \quad (194)$$

După cele expuse anterior presiunea p_e este aproximativ egală cu presiunea medie a zăcămintului p , deci ecuația (194) se poate scrie și sub forma:

$$q = c \left[p - \frac{c}{2A} \right] \quad (195)$$

Ecuația (195) arată cum scade debitul fiecărei sonde, pe măsură ce scade presiunea zăcămintului, în decursul exploatării. De aici rezultă că pentru a menține debitul unui zăcămintă la o valoare constantă, trebuie să se mărească în mod continuu numărul de sonde sau că debitul unui zăcămintă scade continuu, dacă numărul de sonde se menține constant.

În faza inițială de exploatare a unui zăcămintă de gaze, menținerea unui debit total constant, cere adăugarea unui număr mic de sonde noi pe an; cu cît presiunea zăcămintului scade, cu atît numărul de sonde noi care trebuie introduse anual în exploatare se mărește, pentru a menține constant debitul, total al zăcămintului. De la un moment dat, numărul de sonde noi, necesare pe an pentru a menține debitul total constant este atît de mare, cu alte cuvinte, aportul de producție al fiecărei sonde noi este atît de mic, încît el își pierde eficacitatea economică.

Cînd s-a ajuns la această situație, continuarea exploatării cu un debit constant al zăcămintului nu mai este rațională. Urmează exploatarea zăcămintului cu numărul de sonde constant, în timp ce debitul total scade continuu.

b) *Extracția cu debit constant, $Q = \text{constant}$.*
1) *Variația în timp a numărului de sonde.* Pentru a stabili, la amplasarea uniformă a sondelor, relația între numărul de sonde n și timpul (socotit de la începutul exploatării), t , pînă la care n sonde pot da debitul prescris și constant Q , se folosesc următoarele ecuații:

$$q = \frac{Q}{n} = \frac{11,75 \text{ } kh\varphi_s}{\mu} \cdot \frac{p_e^2 - p_s^2}{\log \frac{r_e}{r_s}} \quad (196)$$

în care:

- q este debitul mediu al unei sonde în m^3/zi ;
- Q — debitul total al zăcămintului în m^3/zi ;
- n — numărul de sonde.

Notațiile din partea dreaptă a ecuației (196) sînt cele din ecuația (178).

În ecuația (196) se introduc următoarele expresii:

$$A_1 = \frac{11,75 \text{ } kh\varphi_s}{\mu} \quad (197)$$

Valoarea lui r_e este egală cu jumătatea distanței dintre sonde, deci conform ecuației (173) se poate scrie:

$$\sigma = r_e = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{n}} \quad (198)$$

în care F este suprafața zonei gazeifere.

Deci, în locul expresiei: $\log(r_e/r_s)$

din ecuația (42) se poate scrie:

$$\log \frac{r_e}{r_s} = \log \frac{b}{\sqrt{n}} \quad (199)$$

în care:

$$b = \frac{\sqrt{F}}{2r_s} \quad (200)$$

În locul presiunii p_e din ecuația (196) se poate introduce conform ecuației (169):

$$p_e = p_0 - \frac{V_e}{\Omega}$$

în care:

p_0 este presiunea inițială a zăcămintului, în ata;

V_e — cantitatea de gaze extrasă cumulativ din zăcămint de la începutul exploataării, în m^3n ;

Ω — spațiul de pori ocupat de gaze, în m^3 .

Dacă se ține seama că

$$V_e = Q t \quad (201)$$

în care t este timpul în zile care a trecut de la începutul exploataării până la extracția cantității de gaze V_e , ecuația (169) se poate scrie și astfel:

$$p_e = p_0 - \frac{Q}{\Omega} t \quad (202)$$

În locul lui p_s din (196) se poate scrie conform ecuației (186):

$$p_s = \frac{q}{c} = \frac{Q}{cn} \quad (203)$$

Introducând în ecuația (196) expresiile din ecuațiile (197) (199), (200), (202) și (203) se obține:

$$\frac{Q}{n} = A_1 \frac{\left(p_0 - \frac{Q}{\Omega} t\right)^2 - \frac{Q^2}{c^2 n^2}}{\log\left(b/\sqrt{n}\right)}$$

Rezolvînd ecuația precedentă în raport cu t , se obține:

$$t = \frac{\Omega}{Q} \left[p_0 - \sqrt{\frac{Q}{n} \left(\frac{1}{A_1} \log \frac{b}{\sqrt{n}} + \frac{Q}{c^2 n^2} \right)} \right] \quad (204)$$

Ecuația (204) indică timpul, socotit în zile de la începutul exploataării, până la care n sonde pot da debitul zilnic constant Q .

La amplasarea sondelor în baterie circulară, cînd curgerea gazelor în strat își pierde caracterul radial, relația dintre timp și numărul de sonde pentru un debit constant are forma:

$$t = \frac{\Omega}{Q} \left[p_0 - \sqrt{\frac{Q}{n} \left(\frac{1}{A_1} \ln \frac{R_c^{2n} - r_b^{2n}}{n R_c^n r_s^{n-1}} + \frac{Q}{c^2 n} \right)} \right] \quad (205)$$

în care:

R_c este raza conturului de gaze în m;

r_b — raza bateriei în m,

celelalte notații fiind aceleași ca și în ecuația (204).

Raza conturului circular se calculează cu ecuația:

$$R_c = \sqrt{\frac{F}{\pi}} \quad (206)$$

în care F este suprafața zonei gazeifere (v. fig. 74).

Pentru proiectarea practică a exploataării zăcămintelor, formulele (204) și (205) fiind greoaie, calculul rezultatelor cere mult timp. De aceea, pentru stabilirea relației dintre timpul t și numărul de sonde n , se folosește și o altă formulă care se deduce în felul următor:

Din ecuația (202) reiese:

$$t = \frac{\Omega}{Q} (p_0 - p) \cong \frac{\Omega}{Q} (p_0 - p_e) \quad (206)$$

Din ecuațiile (192) și (203) se deduce:

$$p_e = p_s + \Delta p = \frac{Q}{cn} + \Delta p \quad (207)$$

Introducînd în ecuația (52) pentru expresia din ecuația (207) se obține:

$$t = \frac{\Omega}{Q} (p_0 - \Delta p) - \frac{\Omega}{cn} \quad (208)$$

Avînd în vedere că depresiunea $\Delta p = p_e - p_s$ este constantă pe cea mai mare parte a duratei de exploatare a unui zăcămint (v. exemplul 1), ecuația (208) dă o relație destul de precisă între t și n , pentru perioada de extracție cu debit constant.

Ecuația (208) se poate folosi odată ce se cunoaște valoarea lui Δp , care se determină la executarea probelor de producție a sondelor. Această ecuație este valabilă atît pentru amplasarea uniformă a sondelor, cît și pentru amplasarea lor în baterie cu observația că la amplasarea în baterie, Δp are valori mai mari decît la amplasarea uniformă.

Într-un sistem de coordonate ortogonale, relația dintre timpul t și numărul de sonde n , este reprezentată printr-o hiperbolă, ale cărei puncte au ca abscise timpul și ca ordinate numărul de sonde.

2) Variația în timp a celorlalți parametri ai exploataării. Relația pentru variația presiunii de zăcămint în funcție de timp, se deduce din ecuația: (168):

$$p = p_0 - \frac{V_e}{\Omega}$$

Dacă pentru V_e , cantitatea de gaze extrasă cumulativ din zăcămint se introduce, conform ecuației (202):

$$V_e = Q t$$

se obține:

$$p = p_0 - \frac{Q}{\Omega} t \quad (209)$$

Într-un sistem de coordonate ortogonale cu scări uniforme, relația (55) este reprezentată printr-o linie dreaptă.

— Variația în timp a presiunii dinamice de fund a sondelor p_s este dată, conform ecuației (192) prin formula:

$$p_s = p - \Delta p = p_0 - \Delta p - \frac{Q}{\Omega} t \quad (210)$$

În sistemul de coordonate menționat, relația (210) este reprezentată printr-o linie dreaptă care este paralelă cu linia presiunii de zăcămint $p = f(t)$, din ecuația (209) și la distanța Δp sub aceasta.

Variația în timp a debitului zilnic al fiecărei sonde este dată prin ecuația:

$$q = cp_s = c(p_0 - \Delta p) - \frac{cQ}{\Omega} t. \quad (211)$$

În sistemul de coordonate amintit, relația (211) este reprezentată și ea printr-o linie dreaptă.

c) *Extracția cu numărul de sonde constant*, $n = \text{constant}$. În multe cazuri, perioada de extracție cu debit constant devine nerațională și anume, din momentul cînd menținerea constantă a debitului cere un număr prea mare de sonde noi.

În vederea stabilirii relației dintre parametrul de exploatare și timp, perioada de extracție cu $n = \text{constant}$ se poate împărți în trei etape.

1) *Etapă cu presiunea de zăcămint ridicată*. Această etapă se extinde pînă în momentul cînd, conform ecuației (191), presiunea de zăcămint a scăzut la valoarea:

$$p = 10 \frac{c}{2A} \quad (212)$$

în care:

p este presiunea de zăcămint,

$$A = \frac{\pi k h \varphi_s}{p_a \mu \ln \frac{r_e}{r_s}} - \text{pentru curgerea radială conform ecuației (178),}$$

c — coeficientul de viteză al extracției, conform ecuației (194).

În cazul exemplului 1, această presiune este de 13,3 at.

În această etapă, este valabilă ecuația:

$$\Delta p = p_e - p_s \cong p - p_s = \frac{c}{2A} \quad (192)$$

conform căreia depresiunea Δp , adică diferența dintre presiunea de zăcămint p și presiunea dinamică de fund a sondelor p_s este o constantă.

— Variația presiunii de zăcămint în funcție de timp, se determină în felul următor:

Avînd în vedere ecuațiile (167) și (186) se poate scrie:

$$Q dt = - \Omega dp$$

$$Q = ncp_s = nc(p - \Delta p)$$

din care se deduce, prin eliminarea lui p_s și prin integrare

$$t = \frac{\Omega}{cn} \ln \frac{p_0 - \Delta p}{p - \Delta p} \quad (213)$$

în care:

t este timpul de exploatare, socotit în zile din momentul cînd presiunea de zăcămint are valoarea p_0 , în ata,

p — presiunea de zăcămint după ce s-a scurs timpul, în ata,

Ω — spațiul de pori al zăcămintului ocupat de gaze, în m^3 .

Celelalte notații sînt cele folosite anterior.

De obicei, relația (213) se reprezintă într-un sistem de coordonate ortogonale, printr-o curbă ale cărei puncte au timpul ca abscise și presiunea ca ordonate.

— Variația presiunii dinamice de fund a sondelor în funcție de timp $p_s = f(t)$ se stabilește cu ajutorul ecuației (213) ca:

$$p_s = p - \Delta p. \quad (214)$$

În sistemul de coordonate menționat, relația $p_s = f(t)$ este reprezentată printr-o curbă paralelă cu curba $p = f(t)$.

Variația în timp a debitului zilnic al fiecărei sonde este dată de relația:

$$q = cp_s = c(p - \Delta p) \quad (215)$$

în care se introduc valorile pentru p aflate cu ecuația (213).

2) *Etapă cu presiunea de zăcămint scăzută*. În această etapă presiunea de zăcămint p a scăzut sub valoarea definită prin ecuația (212) fiind totuși încă destul de mare, pentru a asigura sondelor un debit conform ecuației (186).

Această limită inferioară a presiunii de zăcămint, la care se termină etapa de exploatare cu presiunea de zăcămint scăzută, se determină cu ecuația (190) în care, pentru presiunea dinamică de fund a sondelor p_s se introduce valoarea:

$$p_s \cong 1,1 \text{ ata}$$

care este aproximativ valoarea minimă a presiunii dinamice de fund la care o sondă mai produce gaze.

Rezolvînd în aceste condiții ecuația (190) în raport cu p se obține:

$$p = \sqrt{1,21 + 1,1 \frac{c}{A}} \quad (216)$$

În cazul exemplului 1, s-a obținut:

$$c = 952 \text{ m}^3 \text{N/zi} \cdot \text{at}; \quad A = 358 \text{ m}^3 \text{n/zi} \cdot \text{at}^2$$

deci:

$$p = \sqrt{1,21 + 1,1 \frac{952}{358}} = 2,01 \text{ ata.}$$

În această etapă de exploatare, depresiunea Δp nu mai este constantă, ci scade continuu.

— Relația dintre timpul de exploatare t și presiunea de zăcămint p , se determină în felul următor:

Conform ecuațiilor (167) și (186) se poate scrie:

$$Q = ncp_0 = -\Omega \frac{dp}{dt}$$

și conform ecuației (190):

$$Q = n \frac{c^2}{2A} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2A}{c}\right)^2 p^2} - 1 \right] \quad (217)$$

din care rezultă:

$$-\Omega \frac{dp}{dt} = n \frac{c^2}{2A} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2A}{c}\right)^2 p^2} - 1 \right]$$

Rezolvind relația precedentă în raport cu t se obține:

$$t = \frac{\Omega}{cn} \left\{ 2 \left[\frac{1}{-1 + ap + \sqrt{1 + a^2 p^2}} - \frac{1}{-1 + ap_0 + \sqrt{1 + a^2 p_0^2}} \right] + \ln \frac{ap_0 + \sqrt{1 + a^2 p_0^2}}{ap + \sqrt{1 + a^2 p^2}} \right\} \quad (218)$$

în care:

$$a = \frac{2A}{c}$$

- p_0 — presiunea de zăcămint la începutul etapei, în ata;
- p — presiunea de zăcămint la un moment dat, în ata;
- t — timpul care s-a scurs de la începutul etapei până în momentul când presiunea de zăcămint a scăzut la valoarea p , în zile.

Celelalte notații sînt cele folosite anterior. Ecuația (218) are valabilitate generală, atît timp cît extracția se face cu numărul de sonde n , constant. Această ecuație se poate folosi deci și pentru etapa cu presiunea de zăcămint ridicată.

Ca și pentru celelalte etape de exploatare, relația se reprezintă grafic într-un sistem de coordonate ortogonale printr-o curbă ale cărei puncte au timpul în abscisă și presiunea în ordonată.

— Variația în timp a presiunii dinamice de fund a sondelor $p_s = f(t)$ se stabilește cu ajutorul ecuației (190) în care se introduc valorile pentru p , determinate cu ajutorul ecuației (218).

— Variația în timp a debitului fiecărei sonde $q = f(t)$ se poate stabili cu ajutorul ecuațiilor (186) și (190) cum urmează:

$$q = cp_s = \frac{c^2}{2A} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2A}{c}\right)^2 p^2} - 1 \right] \quad (219)$$

În ecuația (219) se introduc valorile pentru p determinate cu ajutorul ecuației (218).

3) Etapa de epuizare a zăcămintului. Această etapă reprezintă etapa finală de exploatare a unui zăcămint de gaze. Ea începe din momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut sub valoarea determinată cu ecuația (216), nemaiputînd asigura un debit al sondelor, conform ecuației (186).

Cu alte cuvinte, depresiunea $\Delta p = p - p_s$ a devenit prea mică pentru a asigura coeficientul optim al vitezei de filtrație c , în jurul găurilor de sonde.

Presiunea dinamică de fund a sondelor se menține în această etapă la valoarea minimă posibilă, respectiv constant la circa 1,1 ata. Sfîrșitul etapei și totodată sfîrșitul extracției sînt date prin momentul cînd presiunea de zăcămint a scăzut și ea la $p \cong 1,1$ ata astfel încît depresiunea $\Delta p = p - p_s \cong 0$.

Din acest moment extracția nu mai poate continua decît cu ajutorul exhaustoarelor și la un preț de cost ridicat.

Relația dintre timpul de extracție t și presiunea de zăcămint, p , în cadrul acestei etape care poate fi numită și etapa presiunii dinamice de fund constante a sondelor, se stabilește conform ecuațiilor (167) și (177), în felul următor:

$$Q = -\Omega \frac{dp}{dt} = nA (p^2 - p_s^2)$$

din care, rezolvînd în raport cu t și integrînd, se obține:

$$t = \frac{\Omega}{2p_s \cdot n \cdot A} \ln \frac{(p_0 - p_s)(p + p_s)}{(p_0 + p_s)(p - p_s)} \quad (220)$$

în care:

- p_0 este presiunea de zăcămint la începutul etapei, în ata;
- p — presiunea de zăcămint la un moment dat, în ata;
- p_s — presiunea dinamică de fund a sondelor, constantă și egală cu $\sim 1,1$ ata;
- t — timpul de la începutul etapei pînă la momentul dat, în zile;

— Variația în timp a debitului fiecărei sonde nu se mai stabilește cu ajutorul ecuației (186), ci cu ajutorul ecuației (177), în care se introduce pentru p_s valoarea $\sim 1,1$ ata, și pentru p , valoarea determinată cu ecuația (220).

d) Exemplul 2.

1) Condițiile problemei. Se va stabili variația în timp a parametrilor de exploatare a zăcămintului de gaze din exemplul 1, în următoarele condiții:

Suprafața zonei gazeifere $F_g = 30 \text{ km}^2$
 saturația în apă remanentă a zonei gazeifere $S_a = 0,20$
 porozitatea zonei gazeifere $m = 0,30$
 zăcămintul se va exploata la început cu un debit constant $Q = 600\,000 \text{ m}^3 \text{N zi}$
 ceea ce corespunde unei extracții anuale de $230,10^6 \text{ m}^3 \text{N}$.

2) Parametrii fixi ai zăcămintului. Spațiul de pori ocupat de gaze conform ecuației (159) este:

$$\Omega = fh m (1 - S'_a) = 30 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 0,3 (1 - 0,2) = 72 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{N.}$$

Rezerva inițială de gaze conform ecuației (160) este:

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{293}{Z_0 (t + 273)} \Omega p_0 = \\ &= \frac{293}{0,9 (20 + 273)} \cdot 72 \cdot 10^6 \cdot 56,1 = \\ &= 4,48 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \text{N.} \end{aligned}$$

Temperatura zăcămintului t , s-a luat de 20°C , care ar rezulta dintr-un gradient termic de $3^\circ/100 \text{ m}$ și din adâncimea zăcămintului de 650 m .

Factorul de abatere al gazului metan Z la 20°C și 50 ata este, conform tabelelor (v. Cap. IV B.d.2.a.) de circa $0,9$.

Raportul dintre extracția anuală și rezerva inițială de gaze este de:

$$\frac{230 \cdot 10^6}{4,48 \cdot 10^9} \cdot 100 = 5,1\%$$

Se menține amplasarea uniformă a sondelor ca și în exemplul 1, deoarece raportul anterior depășește valoarea de 5% .

3) Perioada debitului constant $Q_1 = \text{constant}$. Variația în timp a numărului de sonde n necesare pentru a menține debitul zăcămintului la $600\,000 \text{ m}^3/\text{zi}$, se stabilește cu ajutorul ecuației (208):

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{\Omega}{Q_1} (p_0 - \Delta p) - \frac{\Omega}{cn} = \\ &= \frac{72 \cdot 10^6}{6 \cdot 10^5} (56,1 - 1,3) - \frac{72 \cdot 10^6}{952 n} = \\ &= 6580 - \frac{76\,300}{n} \end{aligned}$$

Debitul inițial al unei sonde este, conform exemplului 1, de $52\,200 \text{ m}^3/\text{zi}$ și cum

$$\frac{Q}{52\,200} = \frac{600\,000}{52\,200} = 11,5,$$

exploatarea zăcămintului va începe cu $n = 12$ sonde.

În ecuația (208) menționată se introduc pentru n valorile $12, 13, 14 \dots 52$ calculându-se, pentru fiecare valoare n , valoarea corespunzătoare a timpului t . Valorile lui t în zile, indică timpul (socotit de la începutul exploatarei) cât poate produce zăcămintul $600\,000 \text{ m}^3/\text{zi}$, cu numărul respectiv de sonde, n .

Rezultatele sînt concentrate în tabela 18 în care pentru fiecare n — se indică timpul în zile și în ani.

În practica proiectării exploatarei zăcămintelor de gaze se sapă mai multe sonde decît indică valorile n din tabela 18 pentru a putea acoperi virfurile de consum și pentru a avea eventual una sau două sonde piezometrice.

În fig. 80 s-a trasat curba care reprezintă numărul sondelor necesare în funcție de timp, $n = f(t)$.

Din analiza cifrelor din tabela 18 rezultă că numărul de sonde noi Δn , necesare în fiecare an pentru a menține debitul zăcămintului constant se mărește continuu. Acelaș lucru se deduce și din fig. 80, unde înclinarea curbei $n = f(t)$ față de axa absciselor crește din ce în ce mai mult. Se va considera $n = 30$, ca numărul maxim rațional de sonde, corespunzînd punctului 1 al curbei.

În acest caz, distanța dintre sonde este, conform ecuației (173):

$$2\sigma = \sqrt{\frac{F}{n}} = \sqrt{\frac{30 \cdot 10^6}{30}} = 1\,000 \text{ m}$$

care este egală cu cea aleasă estimativ în exemplul 1.

Durata totală a perioadei cu debitul constant al zăcămintului este $t = 4\,040$ de zile.

Variația în timp a presiunii de zăcămint p , se stabilește conform ecuației (209)

$$\begin{aligned} p &= p_0 - \frac{Q_1}{\Omega} t = 56,1 - \frac{6 \cdot 10^5}{72 \cdot 10^6} t = \\ &= 56,1 - 0,00834 \cdot t. \end{aligned}$$

În fig. 80, relația $p = f(t)$ este reprezentată printr-o linie dreaptă, determinată prin punctele:

($t_0 = 0$, $p_0 = 56,1 \text{ ata}$) și ($t_1 = 4\,040 \text{ zile}$, $p_1 = 22,5 \text{ ata}$) la sfîrșitul perioadei cu debit constant.

În tabela 18 sînt cuprinse cîteva valori pentru p .

Variația în timp a presiunii dinamice de fund a sondelor p_s , este dată prin ecuația (210):

$$p_s = p - \Delta p = p - 1,3$$

în care se introduc valorile corespunzătoare pentru p .

În fig. 80, relația $p_s = f(t)$ este reprezentată printr-o linie dreaptă, paralelă cu dreapta $p = f(t)$ și la distanța $\Delta p = 1,3 \text{ at}$, sub aceasta.

În tabela 18 sînt date cîteva valori pentru p_s .

Variația în timp a debitului fiecărei sonde se stabilește cu ecuația (211):

$$q = c p_s = 952 p_s$$

în care se introduc valorile corespunzătoare pentru p_s .

În fig. 80, relația $q = f(t)$ este reprezentată printr-o linie dreaptă, determinată prin punctele:

($t_0 = 0$, $q_0 = 52\,200$), respectiv $p_{s0} = 54,8 \text{ ata}$ și ($t_1 = 4\,040$, $q_1 = 20\,000$), respectiv $p_{s1} = 21,2 \text{ ata}$.

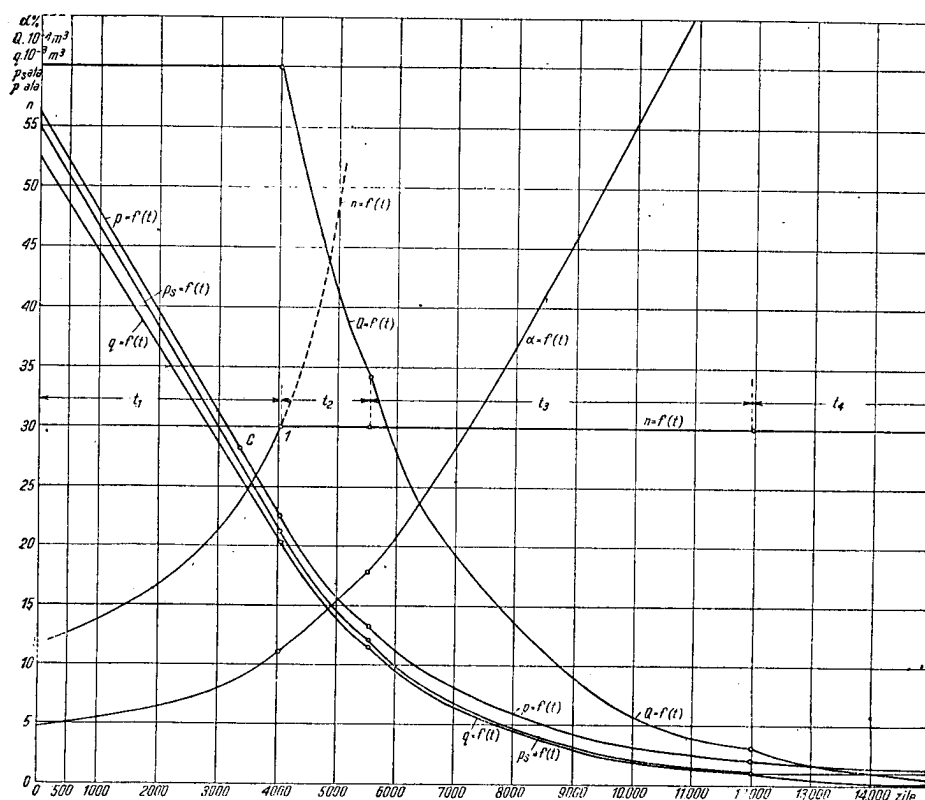


Fig. 80. Variația în timp a parametrilor de exploatare ai unui zăcămint de gaze: n — numărul de sonde, p — presiunea de zăcămint, p_s — presiunea dinamică de fund a sondelor, q — debitul zilnic al unei sonde, Q — debitul zilnic al zăcămintului, α — coeficientul de solicitare.

În tabela 18 sînt date cîteva valori pentru q . Deoarece regimul tehnologic al sondelor este cel stabilit după metoda vitezei-limită de filtrație, coeficientul de solicitare α , adică raportul dintre debitul sondelor q , și debitul lor liber q_l , variază în timp. Valoarea lui α s-a stabilit conform ecuațiilor (182) și (183):

$$\alpha = \frac{q}{q_l} = \frac{q}{Ap^2}$$

trecîndu-se pentru cîteva cazuri, în tabela 18. În fig. 80 s-a trasat relația $\alpha = f(t)$. Curba $Q = f(t)$ este reprezentată în fig. 80 printr-o dreaptă, paralelă cu axa absciselor.

4) Perioada cu numărul de sonde, n , constant.

α) Etapa cu presiunea de zăcămint ridicată. Variația, în timp a presiunii de zăcămint, p , se stabilește conform ecuației (213):

$$t = \frac{Q}{cn} \ln \frac{p_0 - \Delta p}{p - \Delta p} = \frac{72 \cdot 10^6}{952 \cdot 30} \ln \frac{22,5 - 1,3}{p - 1,3} = 2520 \ln \frac{21,2}{p - 1,3}$$

p_0 , presiunea inițială a etapei este egală cu p_1 , presiunea finală a etapei premergătoare.

Durata acestei etape se întinde pînă ce, conform ecuației (212) presiunea de zăcămint p , scade la:

$$p_2 = 10 \frac{c}{2A} = 10 \frac{952}{2 \cdot 358} = 13,3 \text{ ata.}$$

Introducînd în ecuația (213) pentru p , valoarea 13,3 ata, se determină durata etapei în zile, la:

$$t_2 = 1510 \text{ zile.}$$

În tabela 19 sînt cuprinse cîteva valori de timpul t , corespunzătoare unor valori de presiunea p , alese.

În fig. 80 s-a trasat, pe baza acestor date curba $p = f(t)$ în continuarea curbei din perioada premergătoare.

— Variația în timp a presiunii dinamice de fund a sondelor p_s , se stabilește conform ecuației (210):

$$p_s = p - \Delta p = p - 1,3$$

Tabela 18. Variația în timp a parametrilor exploatării, la debitul zăcămintului = constant = 600 000 m³/zi

n	Zile	Anul	Δn	$p_0 = 56,1$ ata (5)	$p_s = 54,8$ ata (6)	$q_0 = 52\ 200$ m ³ /zi (7)	$q_l = 1\ 128\ 000$ m ³ /zi (8)	$\alpha = 4,6$ % (9)
(1)	(2)	(3)	(4)					
12	220	1	1					
13	710	2	1	50,2	48,9	46 600	905 000	5,1
14	1 120	4	1					
15	1 500							
16	1 810	5	2	41,1	39,8	37 800	605 000	6,2
17	2 100	6	1					
18	2 350	7	2					
19	2 560							
20	2 770	8	1	33,0	30,7	30 000	390 000	7,5
21	2 950	9	3					
22	3 110							
23	3 260							
24	3 400			27,8	26,5	25 200	277 000	9,1
25	3 530	10	3					
26	3 650							
27	3 750							
28	3 850	11	3	24,0	22,7	21 600	205 000	10,5
29	3 950							
30	4 040			22,5	21,2	20 000	182 000	11,1
31	4 120							
32	4 200	12	5					
33	4 270							
34	4 330							
35	4 400							
36	4 460							
37	4 520							
38	4 570	13	7					
39	4 620							
40	4 670							
41	4 720							
42	4 765							
43	4 810							
44	4 850							
45	4 885	14	11					
46	4 920							
47	4 955							
48	4 990							
49	5 020							
50	5 050							
51	5 080							
52	5 115							

în care se introduc valorile pentru p , alese anterior.

În tabela 19 s-au dat cîteva valori pentru p_s . Curba $p_s = f(t)$ din fig. 80 este paralelă cu curba $p = f(t)$ la distanța $\Delta p = 1,3$ at, sub aceasta.

— Variația în timp a debitului fiecărei sonde se stabilește cu ajutorul ecuației (215):

$$q = cp_s = 952 p_s$$

în care se introduc pentru p_s , valorile aflate cu ajutorul ecuației (210).

— Variația în timp a coeficientului de solicitare α , se stabilește ca și anterior, cu ajutorul ecuațiilor (182) și (183).

— În această etapă variază (scade) în timp debitul total al zăcămintului Q , conform ecuației:

$$Q = nq$$

în care pentru q se introduc valorile determinate cu ecuația (215).

În tabela 19 sînt cuprinse pentru valorile p , alese anterior, valorile corespunzătoare pentru q , α și Q cum și timpul cumulativ T ,

Tabela 19. Variația parametrilor exploatării, în perioada cu numărul de sonde constant, etapa cu presiune de zăcămint ridicată

ata	zile	zile	Anul	ata	m ³ /zi	m ³ /zi	%	m ³ /zi
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
22,5	0	4 040	12	21,2	20 000	182 000	11,1	600 000
20,0	316	4 356	—	18,7	17 800	143 000	12,4	534 000
18,0	603	4 643	13	16,7	15 900	116 000	13,7	477 000
15,0	1 103	5 143	15	13,7	13 000	81 000	16,1	390 000
13,3	1 510	5 550	16	11,9	11 400	64 000	17,8	342 000

socotit de la începutul exploatării. Totodată în fig. 80 s-au trasat curbele $q = f(t)$, $\alpha = f(t)$ și $Q = f(t)$ în continuarea curbelor respective din perioada premergătoare; curba $n = f(t)$ este reprezentată printr-o dreaptă paralelă cu axa absciselor.

β) Etapa cu presiunea de zăcămint scăzută. Variația în timp, a presiunii de zăcămint p , se stabilește conform ecuației (215):

$$t = \frac{\Omega}{cn} \left\{ 2 \left[\frac{1}{-1 + ap + \sqrt{1 + a^2 p^2}} - \frac{1}{-1 + ap_0 + \sqrt{1 + a^2 p_0^2}} \right] + \ln \frac{ap_0 + \sqrt{1 + a^2 p_0^2}}{ap + \sqrt{1 + a^2 p^2}} \right\}$$

$$\frac{\Omega}{cn} = \frac{72 \cdot 10^6}{952 \cdot 30} = 2520; a = \frac{2A}{c} = \frac{2 \cdot 358}{952} = 0,752; p_0 = p_2 = 13,3 \text{ ata}$$

$$\frac{1}{-1 + ap_0 + \sqrt{1 + a^2 p_0^2}} = \frac{1}{-1 + 0,752 \cdot 13,3 + \sqrt{1 + 0,752^2 \cdot 13,3^2}} = 0,0527$$

$$ap_0 + \sqrt{1 + a^2 p_0^2} = 0,752 \cdot 13,3 + \sqrt{1 + 0,752^2 \cdot 13,3^2} = 20,0.$$

Durata acestei etape se extinde până ce conform ecuației (216) presiunea de zăcămint p , scade la valoarea:

$$p_3 = \sqrt{1,21 + 1,1 \frac{c}{2A}} =$$

$$= \sqrt{1,21 + 1,1 \frac{952}{358}} = 2,01 \approx 2 \text{ ata.}$$

Introducând în ecuația (216) pentru p , valoarea $p_3 = 2$ ata, se determină durata acestei etape la:

$$t_3 = 6420 \text{ zile.}$$

Pentru calcul se aleg mai multe valori p și se determină, cu ajutorul ecuației (216) valorile corespunzătoare pentru t .

— Variația în timp a presiunii dinamice de fund a sondelor p_s se stabilește cu ajutorul ecuației (190):

$$p_s = \frac{c}{2A} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2A}{c} \right)^2 p^2} - 1 \right] =$$

$$= \frac{1}{a} [\sqrt{1 + a^2 p^2} - 1] =$$

$$= \frac{1}{0,752} [\sqrt{1 + 0,752^2 p^2} - 1]$$

în care se introduc valorile alese pentru p .

— Variația în timp a debitului fiecărei sonde se stabilește cu ajutorul ecuației (219):

$$q = cp_s = 952 p_s,$$

în care se introduc valorile aflate pentru p_s .

— Variația, în timp, a coeficientului de solici-tare α și a debitului total al zăcămintului, Q , se stabilesc ca și pentru etapa premergătoare.

În tabela 20 s-au concentrat rezultatele de calcul pentru câteva valori p , alese și în fig. 80 s-au trasat curbele

$p = f(t)$; $p_s = f(t)$; $q = f(t)$; $\alpha = f(t)$ și $Q = f(t)$ în continuarea curbelor din etapa premergătoare.

Curba $n = f(t)$ este reprezentată prin aceeași dreaptă ca și anterior, paralelă la axa absciselor.

γ) Etapa de epuizare a zăcămintului. Variația în timp a presiunii zăcămintului p , se stabilește cu ajutorul ecuației (220):

în care

$$p_s = 1,1 \text{ ata; } p_0 = 2,0 \text{ ata}$$

$$t = \frac{72 \cdot 10^6}{2 \cdot 1,1 \cdot 30 \cdot 358} \ln \left(\frac{2 - 1,1}{2 + 1,1} \cdot \frac{p + 1,1}{p - 1,1} \right) =$$

$$= 3044 \ln \left(0,292 \frac{p + 1,1}{p - 1,1} \right).$$

Durata acestei etape se întinde, teoretic până în momentul cînd presiunea zăcămintului scade la valoarea 1,1 ata.

Introducând în ecuația (220), pentru p , valoarea 1,1 ata, reiese că:

$$t_4 = \infty.$$

Practic, exploatarea se întrerupe în cazul cînd a ajuns la limita rentabilității. În general,

Tabela 20. Variația parametrilor exploatării, în perioada cu numărul de sonde constant, etapa de presiune de zăcămint scăzută

ata	zile	zile	Anul	ata	m ³ /zi	m ³ /zi	%	m ³ /zi
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
13,3	0	5 550	—	12,0	11 400	64 000	17,8	342 000
12,0	280	5 830	16	10,7	10 200	51 700	19,8	306 000
10,0	800	6 350	18	8,75	8 300	35 800	23,2	249 000
8,0	1 440	6 990	20	6,8	6 500	22 900	28,4	195 000
6,0	2 320	7 870	22	4,8	4 600	12 900	35,6	138 000
4,0	3 570	9 120	25	2,9	2 760	5 700	48,3	82 800
2,0	6 520	11 970	33	1,1	1 050	1 430	73,5	31 500

rezultatele obținute cu ajutorul ecuației (220) au numai o valoare calitativă, deoarece:

— În ultima etapă de exploatare, de multe ori nu mai produc toate sondele în mod normal, parte fiind fie inundate, fie accidentate, deci cu productivitatea mică.

— Presiunea dinamică de fund a sondelor nu este perfect constantă, de 1,1 ata; ea scade în cursul etapei de epuizare, pe măsură ce se micșorează debitul sondelor, respectiv scade rezistența de curgere în țevile de extracție.

— Variația în timp, a debitului fiecărei sonde nu mai urmează ecuația (186);

$$q = cp_s$$

ci ecuația (177):

$$q = A(p^2 - p_0^2) = 358(p^2 - 1,1^2).$$

În tabela 21 sînt date pentru cîteva valori p , alese între 2,0 și 1,1 ata, rezultatele corespunzătoare pentru t , T , q și Q .

În fig. 80 s-au trasat curbele: $p = f(t)$, $q = f(t)$ și $Q = f(t)$ presupunînd că toate cele 30 de sonde produc pînă la sfîrșit.

Curba $n = f(t)$ este o dreaptă paralelă cu axa absciselor. De asemenea și curba $p = f(t)$ este o paralelă cu axa absciselor la distanța de 1 ata de la aceasta. Curba $p = f(t)$ se apropie asimptotic de valoarea 1,1 ata și curba $Q = f(t)$ se apropie asimptotic de valoarea 0.

Tabela 21. Variația cîtorva parametri ai exploatării, în perioada cu numărul de sonde constant, etapa epuizării zăcămintului

p ata (1)	t zile (2)	T zile (3)	Anul (4)	q m^3/zl (5)	Q m^3/zl (6)
2,0	0	11 970	33	1 050	31 500
1,8	580	12 550	35	720	21 600
1,6	1 390	13 360	37	470	14 100
1,4	2 720	14 690	41	270	8 100
1,2	5 800	17 770	49	85	2 550
1,1				0	0

În practica proiectării exploatării zăcămintelor de gaze se renunță, de obicei, la calculul parametrilor din etapa epuizării, deoarece pe de o parte, rezultatele nu au valoare cantitativă și pe de altă parte, deoarece contribuția zăcămintelor în epuizare — la îndeplinirea planului general de producție — este cu totul neînsemnată.

7. Rolul presiunii sondelor în transportul gazelor extrase. Deoarece gazele din zăcămintele gazeifere se consumă, fie drept combustibil, fie drept materie primă, în starea și în poziția în care se extrag din sonde, acestea sînt legate direct la conducta de transport spre punctele de consum. De obicei, la începutul exploatării, presiunea de zăcămint satisface relația:

$$p = \Delta p + \Delta'p + p_c \quad (221)$$

în care:

- p este presiunea de zăcămint;
- $\Delta p = p - p_s$ — depresiunea în zăcămint, adică diferența dintre presiunea de zăcămint și presiunea dinamică de fund a sondelor;
- $\Delta'p = p_s - p_t$ — depresiunea în țevile de extracție, adică diferența dintre presiunea dinamică de fund a sondelor și presiunea de la capul de sus al țevilor de extracție (înainte de duza capului de erupție). Această depresiune este necesară pentru a aduce gazele de la fundul sondei la suprafață;
- p_c — presiunea în conducta de transport, în punctul de legătură cu sondele.

Atît timp cît inegalitatea (221) este satisfăcută, transportul gazelor la punctele de consum se face exclusiv cu presiunea sondelor.

Presiunea în conducta de transport p_c , este de considerat o valoare constantă, care depinde de dimensiunile ei și de consumul de gaze prescris. Deci scăderea presiunii de zăcămint pînă la:

$$p < \Delta p + \Delta'p + p_c \quad (222)$$

duce la o scădere rapidă a depresiunii Δp , respectiv $\Delta'p$, care sînt necesare pentru a extrage cantitatea de gaze pe care o pot da sondele în mod rațional, conform ecuației (186):

$$q = cp_s$$

respectiv conform curbei $q = f(t)$ din fig. 80.

Cum însă, pe de altă parte, debitul unei sonde scade proporțional cu pătratul presiunilor (v. ecuația (175)), scăderea presiunii de zăcămint — sub valoarea indicată în ecuația (222) — ar duce la o scădere rapidă a debitului zăcămintului și în scurt timp la imposibilitatea de a-l mai exploata în aceste condiții.

În consecință, între sonde și conducta de transport se intercalează compresoare, care aspiră gazele extrase la presiunea $p_s - \Delta p$ (p_s avînd valorile determinate prin curba $p_s = f(t)$ din fig. 80), comprimîndu-le apoi la presiunea conductei p_c .

Compresoarele necesită investiții mari, instalarea lor reprezintă deci un moment marcant în exploatarea zăcămintelor de gaze. Se deosebește astfel o «perioadă de exploatare fără compresoare» (P.F.C.) și o «perioadă de exploatare cu compresoare» (P.C.C.) a zăcămintelor de gaze.

Dacă, în exemplul 2 presiunea conductei de transport ar fi de 25 ata și depresiunea $\Delta'p$ de 2 at, perioada de exploatare fără compresoare s-ar termina în momentul cînd, conform

ecuației (221), respectiv (222), presiunea de zăcămint a scăzut la valoarea:

$$p = \Delta p + \Delta' p + p_c = 1,3 + 2,0 + 25 = 28,3 \text{ ata.}$$

Acest punct este marcat cu C pe curba $p = f(t)$ din fig. 80. Abscisa acestui punct indică durata perioadei fără compresoare, circa 3 350 de zile.

Între presiunea de zăcămint p și presiunea la capul de erupție p_t , există relația:

$$p = \Delta p + \Delta' p + p_t \quad (223)$$

cu notațiile din relația (221) care este valabilă pentru perioada fără compresoare.

Combinând relația (223) cu relația (221):

$$p > \Delta p + \Delta' p + p$$

se obține pentru perioada fără compresoare, relația:

$$p_t > p_c \quad (224)$$

care enunță faptul cunoscut că în perioada fără compresoare, presiunea la capul de erupție este mai mare decât presiunea conductei. Gazele ajung la suprafață cu un surplus de energie care este absorbit — prin strângere — cu duze de diametre potrivite.

În tehnica modernă de exploatare a zăcămintelor de gaze acest surplus de energie este folosit pentru a ridica presiunea gazelor extrase din alte sonde în stadiu mai avansat de epui-

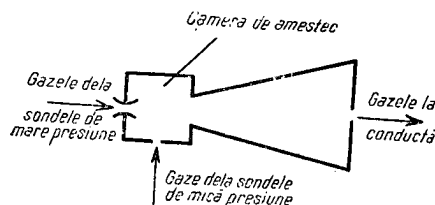


Fig. 81. Schema unui ejector de gaze.

zare, la presiunea conductei de transport. În acest scop, gazele sondelor de mare presiune sînt dirijate în ejectoare care aspiră totodată gazele sondelor cu presiunea scăzută. Cele două categorii de gaze sînt conduse prin camera de amestec a ejectorului unde se formează o presiune superioară celei din conducta de transport. Schema unui astfel de ejector este reprezentată în fig. 81.

Aceste aparate sînt de o construcție relativ simplă, deci puțin costisitoare, putînd înlocui, în condiții favorabile, compresoarele costisitoare, pentru o oarecare perioadă de timp.

8. Ordinea de săpare a sondelor la exploatare zăcămintelor de gaze.

a) Zăcămintă cu un singur orizont gazeifer. Dintre sistemele după care se stabilește ordinea de săpare a sondelor, sistemul masiv, la care toate sondele necesare se sapă simultan, respectiv se pun simultan în producție, poate fi luat în

considerare numai pentru deschiderea zăcămintului, dacă acestuia i se impune — prin Planul de Stat — un debit considerabil chiar de la început. Sistemul masiv cere însă cantități considerabile de utilaj, mină de lucru, materiale și mijloace de transport, astfel încît de multe ori aplicarea lui nu este posibilă.

Din aceste motive, în majoritatea cazurilor se aplică sistemul cu îndesire sau sistemul cu

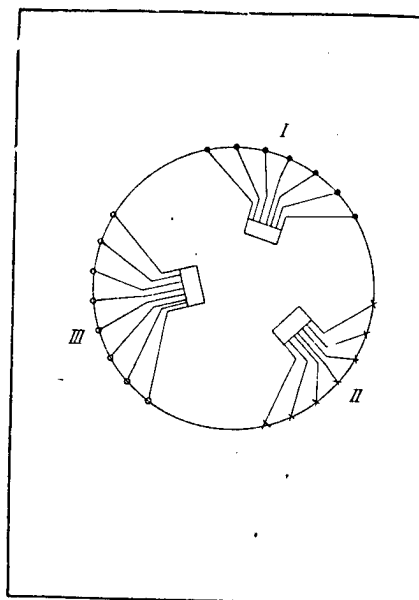


Fig. 82. Schema aplicării sistemului de înaintare la amplasarea sondelor în baterie.

înaintare. Din punct de vedere hidrodinamic, ambele sisteme sînt echivalente.

La amplasarea sondelor în baterie se preferă sistemul cu înaintare, la care se sapă simultan toate sondele de gabarit pe cite o porțiune din suprafața gazeiferă (v. fig. 82). În acest caz se obțin mai multe avantaje de ordin tehnico-economic și anume: aplicarea forajului ramificat, concentrarea conducerii forajului, investiții inițiale mici pentru utilajele de producție și pentru conductele de colectare, volum mic de muncă pentru deservirea sondelor în producție.

La amplasarea uniformă a sondelor, care se face la zăcămintele cu accidente tectonice, se preferă sistemul cu îndesire, la care se sapă sonde uniforme pe toată suprafața gazeiferă, însă la un multiplu al distanțelor din gabaritul final, intercalîndu-se mai tîrziu, între sondele forate, cite o serie de sonde noi, pînă ce la urmă distanțele între sonde s-au micșorat pînă la cele stabilite în gabaritul final (v. fig. 83). Acest sistem, face posibilă îmbunătățirea condițiilor de exploatare a zăcămintului, permițînd ca în cursul forajului de exploatare să

se cunoască mai bine caracteristicile zăcămintului și să se introducă, la nevoie, corective la forarea și exploatarea seriei următoare de sonde.

b) Zăcămintele cu mai multe orizonturi gazeifere. Dacă un zăcămint are mai multe orizonturi gazeifere ale căror proprietăți fizice și în special presiunea, diferă considerabil, aceste

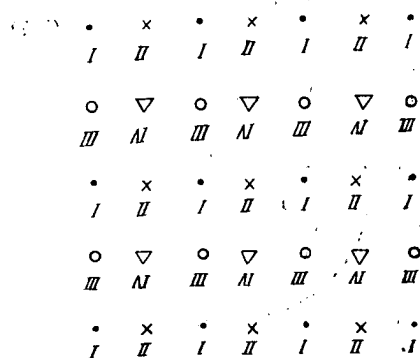


Fig. 83. Sistemele de exploatare cu îndesire a sondelor. Sondele cu I, II, III, IV sînt sondele din primul, respectiv, din al doilea, respectiv din al treilea, respectiv din al patrulea gabarit parțial.

orizonturi nu pot fi exploatate simultan prin aceleași sonde.

La sistemul de exploatare de sus în jos se începe cu exploatarea orizontului superior. Sistemul prezintă avantajul că producția se obține repede și cu investiții inițiale mici. Dezavantajul principal al sistemului constă în faptul că, după epuizarea primului orizont (superior) sondele trebuie adîncite, ceea ce prezintă de obicei dificultăți tehnice. În nici un caz nu se poate executa decît o singură adîncire, astfel încît la zăcămintele cu mai multe orizonturi gazeifere, urmează să se foreze un număr mare de sonde.

Din aceste motive se preferă, în cazurile cînd sarcina de producție, impusă zăcămintului nu este prea mare, sistemul de exploatare de jos în sus, la care se începe cu exploatarea orizontului inferior. Punerea în exploatare a orizontului următor (de mai sus) este relativ ușoară și se poate face după ce presiunea orizontului inferior a scăzut la presiunea celui următor, nefiind necesar să se aștepte pînă ce primul a fost epuizat complet. În acest fel se mărește considerabil și productivitatea sondelor, numărul sondelor necesare fiind relativ mic. Sistemul mai prezintă avantajul că, trecînd cu sapa de la primele sonde prin toate orizonturile gazeifere se obțin din timp cunoștințe asupra caracteristicilor acestora, ceea ce permite o planificare mult mai precisă a întregii exploatare.

c. Bazele economice ale exploatării zăcămintelor de gaze

1. Generalități. Caracterul economic al exploatării zăcămintelor de gaze este determinat de o serie de indici tehnico-economici care, în linii generale, se stabilesc în mod asemănător celor ai zăcămintelor de țitei (v. subcapitolul: Bazele economice ale exploatării zăcămintelor de țitei).

În schelele gazeifere din U.R.S.S. s-au efectuat cercetări de ordin tehnico-economic, în cadrul cărora s-au stabilit acele relații care servesc la determinarea celor doi indici economici principali și anume: productivitatea muncii și prețul de cost. Relațiile menționate însă nu dau cifre precise cu valabilitate generală. Ele pot servi numai pentru orientarea calculelor economice și trebuie verificate pentru fiecare caz în parte, aceasta cu atît mai mult cu cît trebuie să se țină seamă de faptul că în R.P.R. nu s-au făcut pînă în prezent studii economice mai aprofundate.

2. Productivitatea muncii. În scopul determinării productivității muncii care se exprimă prin raportul dintre cantitatea gazelor extrase (exprimată, de exemplu, în mii de m³n) și cantitatea de muncă depusă (exprimată de exemplu în oameni × ani), s-au stabilit următoarele relații:

a) Munca depusă de muncitori la extracție. Prin muncitori se înțeleg, în acest caz, muncitorii ocupați cu întreținerea sondelor, electricienii, mecanicii și alți muncitori calificați, ocupați cu lucrări de rutină în schelă manipulanții la sistemul de colectare a gazelor, cum și muncitorii auxiliari.

Relația stabilită are forma:

$$M_d = \frac{15}{(\Sigma n)^{0,9}} \quad (225)$$

în care:

M_d este numărul de muncitori (inclusiv muncitorii ocupați la stațiile de compresoare, dacă există) care revin unei sonde;

Σn — numărul de sonde productive ale șantierului.

Reprezentarea grafică a relației (225) este dată în fig. 84 din care reiese că numărul de muncitori necesari pentru fiecare sondă se micșorează cu cît numărul sondelor se mărește, respectiv cu cît distanța dintre ele se micșorează.

b) Munca depusă de personalul tehnico-administrativ la extracție. Acest personal cuprinde inginerii, tehnicienii și salariații de la conducerea schelei. Relația rezultată are forma:

$$M_t = \frac{8}{(\Sigma n)^{0,7}} \quad (226)$$

în care:

M_t este numărul de salariați tehnici și administrativi care revin unei sonde;
 $(\sum n)$ — numărul de sonde productive ale șantierului.

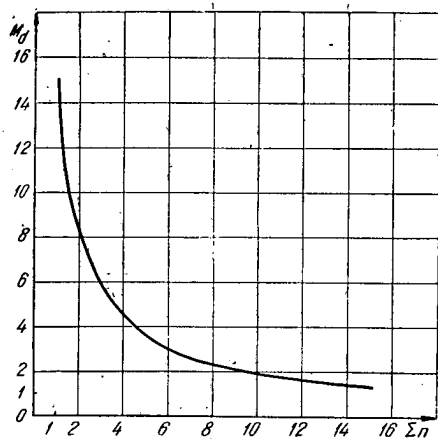


Fig. 84. Numărul de muncitori M_d , care revin unei sonde de gaze în funcție de numărul total $\sum n$ de sonde productive.

Reprezentarea grafică a relației (72) este dată în fig. 85.

Caracterul curbei este asemănător celui al curbei din fig. 84.

c) Munca depusă pentru forarea sondelor. Deoarece munca depusă pentru forarea son-

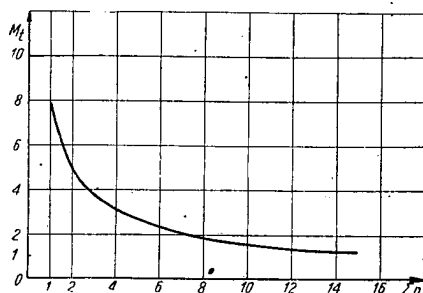


Fig. 85. Numărul de salariați tehnici și administrativi M_t , care revin unei sonde de gaze în funcție de numărul total $\sum n$ de sonde productive.

delor diferă foarte mult de la șantier la șantier, nu este posibil să se stabilească o relație analitică, nici chiar aproximativă, de o valabilitate mai generală.

În fig. 86 s-a reprezentat o curbă care dă, pentru un anumit șantier, numărul de salariați necesari unui granic M_f , în funcție de numărul total de granice în lucru, ale oficiului de foraj, g . Cifrele care reies din curbă au o valoare pur orientativă.

d) Determinarea productivității muncii. Productivitatea muncii, exprimată în mii de m^3N de gaze extrase pe om \times an, se poate determina cu ajutorul ecuației:

$$P_M = \frac{365 V_e}{1000 \left[M_f \frac{n}{l} + \sum (n_i t_i) (M_{di} + M_{ti}) \right]} \quad (227)$$

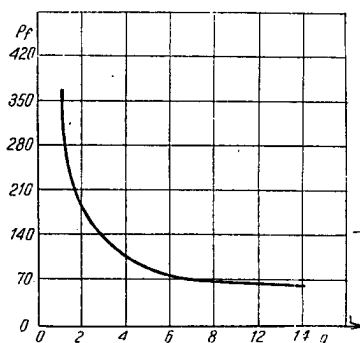


Fig. 86. Numărul de salariați necesari pentru un granic de foraj în funcție de numărul de granice în funcțiune g , ale oficiului de foraj.

P_M este productivitatea muncii, în mii de m^3 om \times an;

V_e — cantitatea de gaze extrasă total în m^3N ;

M_f — numărul de salariați care revin unui granic de foraj conform fig. 86;

n — numărul total de sonde forate;

l — numărul total de sonde, care se sapă anual cu un granic;

t_i — numărul de zile al etapei de exploatare, în care numărul de sonde este egal cu n_i ;

M_{di} — numărul de muncitori care revin unei sonde productive în etapa i , conform fig. 84 sau ecuației (225);

M_{ti} — numărul de salariați tehnici și administrativi care revin unei sonde productive în etapa i conform fig. 85 sau ecuației (226).

3. Prețul de cost. Prețul de cost se exprimă prin raportul dintre cheltuielile totale de exploatare și cantitatea de gaze extrasă. La rîndul lor cheltuielile totale de exploatare se compun din două elemente: cheltuielile de întreținere și amortizarea investițiilor.

a) Cheltuielile de întreținere. Cheltuielile de întreținere se compun din două elemente și anume: salarii și cheltuieli generale.

Dintre acestea, salariile se pot calcula cu ajutorul ecuațiilor (225) și (226) respectiv al fig. 84 și 85, prin care se stabilește numărul de salariați. Numărul acestora se înmulțește cu salariile respective sau cu salariul mediu, pe câte o categorie.

Pentru calculele cheltuielilor generale s-a găsit, pentru unele șantiere din U.R.S.S. relația:

$$C_g = 78 \sqrt[4]{\sum n} \quad (228)$$

în care:

C_g reprezintă cheltuielile generale ale șantierului pe an, în mii de ruble, numărul de sonde productive ale șantierului.

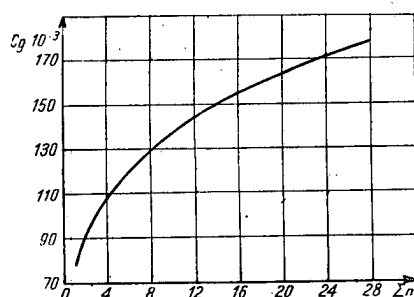


Fig. 87. Cheltuielile generale C_g , în mii de ruble ale unui șantier gazeifer, în funcție de numărul de sonde $\sum n$.

Reprezentarea grafică a relației (228) este dată în fig. 87.

În cazul cînd șantierul are o stație de compresoare, cheltuielile de întreținere ale acestora trebuie adăugate la cheltuielile de întreținere



Fig. 88. Caracterul relației dintre cheltuielile de întreținere și puterea unei stații de compresoare.

ale șantierului. Fig. 88 dă o curbă care reprezintă caracterul variației cheltuielilor de întreținere ale stațiilor de compresoare, în funcție de puterea lor.

b) Amortizarea investițiilor. Investițiile se calculează separat pe fiecare dintre elemente:

— Forajul sondelor care se stabilește după devizul-normă de foraj al unei sonde din șantierul respectiv.

— Mijloacele de bază pentru extracție, în care intră: utilajul subteran și de suprafață a sondelor, ca: țevi de extracție, capete de erupție, separatoare, instalații de măsurat, etc.

— Investițiile generale în care intră: sistemul de colectare al gazelor de șantier, atelierele, mijloacele de transport și comunicație, clădirile, etc.

— Stația de compresoare, dacă este cazul.

— Conducta magistrală de transportul gazelor, în întregime dacă deservește numai șantierul analizat, respectiv o parte corespunzătoare, cînd conducta deservește mai multe șantiere.

Cotele de amortizare ale elementelor de investiții menționate se stabilesc conform legilor în vigoare, respectiv normelor stabilite.

c) Determinarea prețului de cost. Prețul de cost se poate determina cu ajutorul ecuației:

$$C = 10^3 \frac{C_s + C_g + I_t + I_b + I_g + I_s + I_c}{V_e} \quad (229)$$

în care:

C este prețul de cost al gazelor în lei pe 1000 $m^3 N$;

C_s, C_g — cheltuielile pentru salarii, respectiv cheltuielile generale, în lei;

I_t, I_b, I_g, I_s, I_c — cheltuielile de investiție pentru foraj, respectiv mijloace de bază pentru extracție, respectiv investiții generale, respectiv stația de compresoare, respectiv conducta magistrală, în lei;

V_e — cantitatea de gaze extrasă, în $m^3 N$.

Este de observat că prețul de cost depinde și de sistemul de amplasare a sondelor (uniform, respectiv în baterie).

d. Bazele proiectării complexe a exploatării zăcămintelor de gaze

1. Cuprinsul unui proiect complex. Un proiect complex de exploatare cuprinde următoarele părți principale:

— Studiul caracterului zăcămintului, privind caracterul lui geologic, fizic și productiv.

— Partea gazodinamică, în cadrul căreia se stabilește variația în spațiu și în timp a parametrilor de exploatare, pentru diferite variante de exploatare alese.

— Partea economică, care cuprinde stabilirea indicilor tehnico-economici ai exploatării pentru fiecare variantă din partea hidrodinamică și alegerea variantei optime din punct de vedere economic.

— În cazul cînd proiectul cuprinde exploatarea mai multor zăcămintele și se mai adaugă o parte, în cadrul căreia se stabilește repartizarea producției totale planificate pe fiecare zăcămint în parte.

2. Studiul caracterului unui zăcămint de gaze. Acest studiu urmează liniile generale indicate în subcapitolul B.d. (exploatarea zăcămintelor de țitei).

a) *Studiul caracterului geologic al zăcămintului.* Acest studiu se efectuează analog cu cel al zăcămintelor de țiței (v. B.d.). El cuprinde o parte care tratează geologia generală (tectonica și stratigrafia) a regiunii și structurii în care se află zăcămintul și o parte care tratează geologia zăcămintului propriu-zis. O atenție deosebită trebuie dată stratelor-reper care se găsesc în unele structuri ca de exemplu tufurile dacitice din zăcămintele cuvetei din Transilvania.

Materialul documentar care însoțește acest studiu este analog celui de la zăcămintele de țiței.

b) *Studiul caracterului fizic al zăcămintului.*

1) *Condițiile inițiale de presiune și temperatură.* Presiunea zăcămintului se stabilește măsurând presiunea la câteva sonde noi, după ce ea s-a stabilizat.

Dacă s-a măsurat presiunea la gura sondei p , presiunea de fund p_e , se calculează după ecuația (18^o): valoarea ei este practic egală cu presiunea de zăcămint deoarece aceasta nu variază cu adâncimea, decât foarte puțin, din cauza greutateii specifice foarte mici a gazelor.

Temperatura de zăcămint se stabilește ca și la zăcămintele de țiței.

2) *Proprietățile fluidelor din zăcămint.* Dintre proprietățile gazelor se determină: compoziția, greutatea specifică și viscozitatea. În foarte multe cazuri gazele conțin peste 95% metan, deci proprietățile lor se pot lua din tabelele și diagramele din Cap. IV B.d.a) 1) sau Cap. IV B.d.2.a) și b), atît pentru condițiile de suprafață, cît și pentru cele de zăcămint.

Proprietățile apelor de zăcămint se stabilesc ca și la zăcămintele de țiței.

3) *Proprietățile fizice ale rocii colectoare.* Se stabilesc:

— Porozitatea. Porozitatea medie a zăcămintului se calculează cu ajutorul ecuațiilor (15) și (16).

— Permeabilitatea. Permeabilitatea medie a zăcămintului se calculează cu ajutorul ecuațiilor (28) și (29).

— Saturația și remanentă cu apă.

Documentarea necesară studiului caracterului fizic al zăcămintului este mai puțin amplă decît la zăcămintele de țiței, lipsind rezultatele analizelor de țiței și ale probelor de fund.

c) *Studiul caracterului productiv al zăcămintului.* Acest studiu cuprinde următoarele obiecte:

1) Datele obținute la probele de producție executate la sondele noi, în special presiunile, debitele și coeficienții vitezei-limită de filtrație.

2) Variația în timp a presiunii de zăcămint și a debitului sondelor.

3) Variația în timp a poziției conturului gaze-apă.

4) Stabilirea regimului de zăcămint (v. ecuațiile (171) și (172)).

5) Stabilirea rezervei de gaze.

6) Stabilirea etanșeității faliilor: aceasta se face ca și la zăcămintele de țiței.

Documentarea necesară acestui studiu cuprinde un material asemănător celui de la zăcămintele de țiței, cu excepția datelor în legătură cu țițeiul ca: rații gaze-țiței, rații de soluție, coeficienți de volum ai fazelor lichide cum și, bineînțeles, variația în timp a proprietăților țițeiului însuși.

3. *Partea hidrodinamică a proiectului.* În funcție de debitul pe care trebuie să-l asigure zăcămintul, conform planului și în funcție de datele obținute din studiul caracterului zăcămintului, se alege întîi sistemul de amplasare a sondelor, uniform sau în baterie. Apoi se execută calculul gazodinamic propriu-zis, stabilind pentru fiecare perioadă și etapă de exploatare durată și variația, în timp, a parametrilor exploatarei, conform celor expuse în exemplele 1 și 2, prezentînd rezultatele de calcul sub formă de tabele și curbe:

$$n = f(t); p = f(t); p_s = f(t); q = f(t);$$

$$Q = f(t); \alpha = f(t)$$

ca în fig. 80.

Calculul hidrodinamic se face pentru mai multe variante ale numărului de sonde productive, pentru care se aleg valori care oscilează în jurul punctului 1 din fig. 80, cu scopul de a determina, în cele ce urmează, numărul de sonde rațional din punct de vedere tehnic și economic. Numărul de sonde n , determină între altele durata perioadei de exploatare în care zăcămintul asigură un debit constant, perioadă care este de o importanță deosebită din punct de vedere productiv și economic. La calculul gazodinamic se mai adaugă și calculul puterii necesare a stației de compresoare, după ecuația:

$$L = 0,00924 \frac{Q}{\eta} \left[\left(\frac{p_r}{p_a} \right)^{0,167} - 1 \right] \quad (230)$$

în care:

L — puterea stației de compresoare în CP;
 Q — debitul de gaze al stației, în $m^3N/24$ ore;

p_r — presiunea de refulare, în ata;

p_a — presiunea de aspirație, în ata;

η — randamentul total al compresoarelor.

Ecuația (230) corespunde unei comprimări politropice, cu exponentul 1,2.

În practică, de obicei presiunea de refulare a compresoarelor rămîne constantă, în timp ce presiunea la aspirație scade în raport cu scăderea presiunii sondelor. În consecință, puterea stației de compresoare trebuie să crească în timp, iar calculul puterii trebuie făcut pentru mai multe momente ale exploatarei.

Dacă pentru zăcămintul în proiect se construiește o conductă magistrală nouă care reprezintă o investiție considerabilă, calculul stației de compresoare se face pentru mai

multe variante ale presiunii de refulare p , care determină puterea respectiv investițiile necesare. La fel se calculează și conducta magistrală, pentru mai multe variante ale presiunii care determină diametrul, respectiv costul conductei.

Dintre variante se alege, în cele ce urmează, cea mai rațională din punct de vedere tehnic și economic.

4. Partea economică a proiectului. Pentru a stabili efectul economic al proiectului, se determină cei doi indici tehnico-economici principali pentru diferitele variante, alese în partea hidrodinamică a proiectului și anume productivitatea muncii și prețul de cost.

Dacă proiectul prevede exploatarea unui singur zăcămint, debitul lui este impus de obicei prin planul de producție.

Indicii tehnico-economici se calculează conform celor expuse în subcapitolul anterior.

Rezultatele obținute pentru diferitele variante se concentrează în tabele și se reprezintă și grafic, sub formă de curbe care dau valoarea indicelui respectiv în funcție de numărul de sonde.

Criteriul cel mai important la alegerea variantei celei mai raționale de exploatare îl formează, în cele mai multe cazuri, valoarea minimă a prețului de cost. În acest caz, criteriul valorii maxime a productivității muncii servește drept cifră de control și eventual drept corectiv la soluția aleasă.

5. Repartizarea debitului planificat pe mai multe zăcămint. Dacă proiectul de exploatare cuprinde mai multe zăcămint, fie că este vorba despre mai multe structuri, fie despre o singură structură cu mai multe complexe gazeifere care trebuie exploatare separat, repartizarea debitului se face, în linii generale, conform celor expuse la B.1. din partea privind exploatarea zăcămintelor de țitei și anume:

— Pentru fiecare zăcămint în parte se face câte un studiu geologic, după care se stabilește — pentru zăcămint — numărul optim de sonde pentru un debit ales, luând drept criteriu prețul de cost minim.

Stabilirea numărului optim de sonde se repetă pentru mai multe variante de debit alese, observând că acest calcul se poate limita la perioada debitului constant, în care se extrag de obicei 70–80% din rezerva totală a zăcămintului.

a) Pentru fiecare zăcămint se construiește câte o curbă reprezentând prețul de cost în funcție de debitul (zilnic sau anual) (v. fig. 89).

b) Într-un singur sistem de coordonate se construiește pentru fiecare zăcămint câte o curbă care reprezintă cheltuielile anuale de exploatare, în funcție de debitul lui (v. fig. 67).

La toate curbele se duce câte o tangentă, toate tangentele formând același unghi α cu axa absciselor. Punctele de atingere T'_1, T'_2, \dots au drept abscise producțiile Q'_1, Q'_2, \dots pentru care este satisfăcută condiția din ecuația (145):

$$\frac{\partial E_1}{\partial Q_1} = \frac{\partial E_2}{\partial Q_2} = \dots$$

în care:

E_1, E_2, \dots reprezintă cheltuielile de exploatare ale zăcămintului, 1, 2, ...;

Q_1, Q_2, \dots debitul zăcămintului 1, 2, ...

Dacă debitul total planificat Q' este:

$$Q' = Q'_1 + Q'_2 + \dots$$

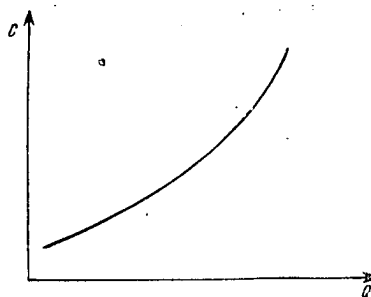


Fig. 89. Exemplu de relație dintre prețul de cost, C , și debitul, Q , al unui zăcămint de gaze.

cheltuielile totale de exploatare sînt un minimum.

c) Se trasează un nou sistem de coordonate în care se duce la distanța Q' , o paralelă la axa absciselor (v. fig. 68). Pe această paralelă se fixează punctele A'_1, A'_2, \dots cu abscisele Q'_1, Q'_2, \dots .

d) La curbele $E = f(Q)$ din fig. 67, se duce un al doilea rînd de tangente, făcînd unghiul β cu axa absciselor. Abscisele punctelor de atingere T''_1, T''_2, \dots marchează debitele Q''_1 respectiv Q''_2, \dots . În fig. 68 se duce o altă paralelă, la distanța $Q'' = Q''_1 + Q''_2 + \dots$ de la axa absciselor; de această paralelă se fixează punctele A''_1, A''_2, \dots cu abscisele Q''_1, Q''_2, \dots .

e) Repetînd acest procedeu de cîteva ori, în fig. 68 se obțin punctele $A'''_1, A'''_2, \dots, A^{IV}_1, A^{IV}_2, \dots$.

f) În fig. 68 se trasează cîte o curbă 1, 2, ... din punctele $A'_1, A''_1, A'''_1, \dots$ respectiv $A'_2, A''_2, A'''_2, \dots$ etc. Fiecare dintre aceste curbe este locul geometric al punctelor a căror ordonată indică debitul total planificat, în timp ce abscisa dă debitul corespunzător optim al zăcămintului respectiv.

g) În fig. 68 ducând o paralelă la axa absciselor, la distanța producției totale planificate, această paralelă taie curbele 1, 2... în punctele a căror abscisă corespunde producției optime pentru zăcămintul respectiv.

h) După ce s-a stabilit astfel debitul optim pentru fiecare zăcămint, din rezultatele cal-

culor anterioare se determină numărul optim de sonde.

i) În cazul când se ia drept criteriu pentru repartizarea debitului, prețul optim de cost pe toată grupa de zăcămint proiectate, criteriul productivității muncii servește ca cifră de control și verificare.

BIBLIOGRAFIE

- A. P. CRÎLOV, N. N. GLOGOVSKI și alții.: Bazele științifice ale exploatării zăcămintelor petrolifere.— Editura Tehnică 1951.
- I. M. MURAVIAV, A. P. CRÎLOV: Exploatarea zăcămintelor de țiței. — Editura Tehnică, 1950.
- B. B. LAPUK.: Bazele hidrodinamice ale exploatării zăcămintelor de gaze. — Gostoptehizdat, 1947.
- N. M. NICOLAEVSKI.: Metoda de proiectare a exploatării unei grupe de zăcămint de gaze. — Gostoptehizdat, 1952.
- M. MASKUT: Bazele fizice ale tehnologiei extracției de țiței, — Gostoptehizdat 1953
- Colecția revistelor Neftianoe Hazialstvo 1954—1955 sem. I.
- B. St. GRINENKO: Bazele exploatării zăcămintelor de gaze. — Institutul de Petrol și Gaze, București, 1952.
- M. METSCH: Bazele științifice ale exploatării zăcămintelor de țiței și gaze. — Institutul de Petrol și Gaze, București, 1951.

Responsabil de carte: Ing. Regenstreiff Dan
Tehnoredactor: Magheruşan Valentin
Corector responsabil: Mitu Aristide

Dat la cules 08.01.55. Bun de tipar 17.09.55. Hirtie velină de 65 g/m², 70×100/16. Coli editoriale 65,5. Coli tipar 39. Planşe tipo 10. Comanda S. 824. A. 04324/54. Indicele de clasificare pentru bibliotecile mari 622.323(021). Indicele de clasificare pentru bibliotecile mici 622.

980 Tiparul executat la Intreprinderea Poligrafică nr. 4,
Calea Şerban Vodă 133, Bucureşti — R.P.R.

E R A T Ă

Pag.	Col.	Rînd	în loc de	se va citi	Din vina
153	II	26 j	mărirea	urmărirea	Editurii
167	I	20 s	<	>	»
174		fig. 45	de numerotat rîndurile desenului de sus în jos cu 1, 2, 3, 4, ... 24		»
177		ec (60)	$\lambda_M = 1 + \dots$	$\lambda_M = \sqrt{1} \dots$	»
177		ec (62)	$v_{1,2} \cdot \lambda_1 \rho_{n_1} + \lambda_2 \rho_{n_2}$	$v_{1,2} \cdot \lambda_1 \rho_{m_1} + \lambda_2 m_2$	»
182	II	ec (75)	$(m/20)^{19,49}$	$0,1 (m/20)^{19,49}$	»
203	I	fig. 143	miscibilitate	imiscibilitate	»
218		ec (39)	$\sum u_i k_i = 1$	$\sum n_i k_i = 1$	»
420		ec (34)	$m_d = m_d (\dots)$	$m_d = m_e (\dots)$	»
420	I	ec (35)	$A = \dots + 3S_n S'_u (\dots$	$A = \dots + 3S_n S'_n (\dots$	»
423	I	10 j	*) Cap. IV	*) v. nota de la pag. 422	»
423	I	28 s	$b_0)$	$b_0)^*$	»
423	I	31 s	$B_0)$	$B_0)^*$	»
447	I	8 s	încă, practic	încă *) practic	»
454		ec (9)	$+ N_t l^{-\beta_t} (\dots)$	$+ N_t e^{-\beta_t} (\dots)$	»
458	I	16 s	fig. 68 și 69	fig. 63 și 64	»
459		1 j	$W \int \dots$	$W = \int \dots$	»
466		ec (34)	$\left(1 - \frac{r_1}{Y_0} - W_2\right)$	$\left(1 - \frac{r_1}{Y_0}\right) - W_2$	»

Sanitized Copy Approved for Release 2010/02/25 : CIA-RDP80T00246A034900380001-3

Ed. Tehnică (P)	Editura Tehnică (P)	Editura Tehnică (P)
824	824	824
214	214	214
	Manualul Inginerului Petrolist. vol II	Man. Ing. Petrolist vol II
	Numărul din borderoul de casă al unității	Numărul din borderoul de casă al unității
Lei 57 (Rămîne la cumpărător	Lei 57 (Rămîne la unitate	Lei 57 (Pentru centrul regional CLDC)

Sanitized Copy Approved for Release 2010/02/25 : CIA-RDP80T00246A034900380001-3